

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Milena Sedlářová

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroniky

**Analýza provozních parametrů měniče
kmitočtu Sinamics S120**

***Analysis of Operating Parameters of the
Frequency Converter SINAMICS S120***

2013

Milena Sedlářová

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milena Sedlářová**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: **Analýza provozních parametrů měniče kmitočtu Sinamics S120**
Analysis of Operating Parameters of the Frequency Converter
SINAMICS S120

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te základní analýzu monitoringu parametrů měniče Sinamics S120.
2. Specifikujte jak lze analyzovat vnitřní parametry měniče a jak je možné jejich využití v regulačních smyčkách.
3. Na základě pokynů vedoucího diplomové práce proved'te konkrétní měření a analýzu získaných dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

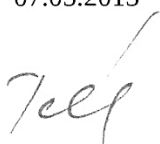
Firemní literatura k měniči kmitočtu Sinamics S120.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.“

V Ostravě, dne6.5.2013.....

Podpis.....Milma Gollárová.....

Poděkování:

Ráda bych poděkovala všem, kteří mi byli oporou při tvorbě této diplomové práce. V první řadě mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za rady, konzultace a ochotu při realizaci praktické části této práce. Dále chci velmi poděkovat své rodině za maximální podporu během celého dosavadního studia i při tvorbě této práce.

Abstrakt

V této diplomové práci jsem se v úvodní kapitole věnovala obecnému rozdělení frekvenčních měničů a jejich obvyklým zapojením, další kapitola je věnována měniči kmitočtu Sinamics S120, kde jsem se podrobněji zabývala funkcemi ovládacího programu STARTER (verze 4.3) určeného pro měniče kmitočtu od firmy SIEMENS. Zejména funkcí TRACE a následně matematickými funkcemi, které jsou její součástí. Praktická část této práce pojednává o měření ve školní laboratoři na měniči kmitočtu Sinamics S120 a pokračuje následnou analýzou změřených dat. Dále mi byla poskytnuta k analýze a vyhodnocení data, která byla získána při měření v rámci projektu ALFA. Tato data umožňovala vhodným způsobem prověřit matematické funkce ovládacího programu STARTER a veškerá měření jsou ve formě grafů k dispozici v elektronické podobě v příloze této diplomové práce.

Klíčová slova

Měniče frekvence, Software STARTER, Funkce TRACE, Matematické operace, Program Microsoft Excel.

Abstract

First part of this thesis describes basic categories of frequency converters and typical ways of connecting them. Another part of my thesis is focused on Sinamics S120 static frequency converter. In detail I looked into functions of operating software called STARTER (version 4.2) determined for SIEMENS made static frequency converters. Particularly I focused on TRACE function and mathematical functions, which are a part of TRACE function. Practical part of this thesis describes measurements carried out in school laboratory using Sinamics S120 static frequency converter and is followed by analysis of gained data. Further I obtained data gained during measurements performed in terms of the ALFA project. These data enabled me to appropriately check mathematical functions of operating programme STARTER. All measurements are in form of charts available in an electronic attachment of this thesis.

Key Words

Frequency converter, Software STARTER, Function TRACE, Mathematics Operations, Software Microsoft Excel.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratky:

AC	- střídavý proud
ALM	- vstupní pulsní usměrňovač a filtr
AM	- asynchronní motor
CU	- řídicí jednotka
DC	- stejnosměrný proud
Drive-CLiQ	- uzavřená sběrnice firmy Siemens
FFT	- rychlá Fourierová transformace
GTO	- vypínatelný tyristor
IGBT	- bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IGCT	- vypínatelný tyristor s integrovanou řídicí elektrodou
MOSFET	- unipolární tranzistor řízený polem
MS	- mechanická spojka
SMM	-výstupní střídač
SS	- stejnosměrný
SSTG	- stejnosměrný tachogenerátor

Symboly:

$\cos \varphi$	- účinník	(-)
f_{vz}	- vzorkovací frekvence	(Hz)
f_l	- vstupní frekvence	(Hz)
f_2	- výstupní frekvence	(Hz)
I_d	- tokotvorná složka proudu	(A)
I_q	- momentotvorná složka proudu	(A)
I_l	- satorový proud	(A)
M	- moment motoru	(N·m)
n	- otáčky	(ot·min ⁻¹)
P_{AM}	- výkon motoru	(W)
P_{CU}	- příkon řídicí jednotku	(W)
R_l	- odpor statoru	(Ω)
U_d	- napětí meziobvodu	(V)
U_l	- satorové napětí	(V)
ω	- úhlová rychlost	(rad·s)
Ψ_l	- magnetický tok statoru	(Wb)
$\Psi_{l\alpha,\beta}$	-spřažený magnetický tok statoru	(Wb)

Obsah

1. Úvod.....	- 1 -
2. Měníče frekvence.....	- 2 -
2.1. Přímý měnič frekvence.....	- 3 -
2.2. Nepřímý měnič frekvence	- 3 -
2.2.1. Nepřímé měniče kmitočtu napět'ového typu	- 4 -
2.2.2. Nepřímé měniče kmitočtu proudového typu	- 5 -
2.3. Metody řízení rychlosti AM napájeného z měniče kmitočtu	- 7 -
2.3.1. Skalární řízení U/f	- 7 -
2.3.2. Vektorové řízení	- 9 -
2.3.3. Přímé řízení momentu	- 10 -
2.4. Měníč frekvence a rekuperace elektrické energie motoru.....	- 11 -
3. Měníč frekvence Sinamics S120	- 12 -
3.1. Základní vlastnosti měniče Sinamics S120	- 12 -
3.2. Konfigurace pohonu v laboratoři E103	- 14 -
3.3. Software STARTER pro obsluhu měniče Sinamics S120	- 15 -
3.3.1. Vnitřní parametry měniče.....	- 16 -
3.3.2. Funkce TRACE	- 17 -
3.3.3. Matematické operace.....	- 21 -
4. Měření v laboratoři a analýza dat	- 25 -
4.1. Schéma zapojení měřeného pracoviště.....	- 25 -
4.2. Popis a parametry jednotlivých částí měřeného pracoviště.....	- 26 -
4.3. Vzorce použité v analýze změřených dat	- 27 -
4.4. Parametry měniče použité pro měření pomocí funkce <i>Trace</i>	- 27 -
4.5. Měření a analýza dat	- 28 -
4.5.1. Měření příkonu řídicí jednotky (CU) na prázdkno	- 28 -
4.5.2. Měření vstupního napětí a proudu, napětí meziobvodu	- 29 -
4.5.3. Měření magnetizačního a momentotvorného proudu.....	- 31 -
4.5.4. Měření parametrů při rozběhu a brzdění motoru naprádkno	- 33 -
5. Projekt ALFA	- 38 -
5.1. Parametry měniče použité při měření.....	- 38 -
5.2. Parametry měniče využité při měření Analýza měřených dat	- 39 -
5.2.1. Měření č. 19.....	- 40 -
5.2.2. Měření č. 36.....	- 43 -
6. Závěr	- 46 -

Použitá literatura	- 47 -
Seznam příloh	- 48 -

1. Úvod

Firma Siemens již řadu let vyvíjí a zdokonaluje produkty z oblasti techniky pohonů a nabízí ucelený systém, od návrhu pohonu, volbu jednotlivých motorů, frekvenčních měničů, mechanické komponenty, jako spojky a převodovky, až po software, sloužící k pohodlnému ovládání pohonů.

Mezi frekvenční měniče vyvíjené firmou Siemens patří také typ Sinamics S120, který je předmětem této diplomové práce a je umístěn v laboratoři katedry Elektroniky, fakulty FEI VŠB - TU Ostrava a slouží zde především pro praktickou výuku studentů.

V úvodní části diplomové práce nastiňuji problematiku frekvenčních měničů, uvádím zde jednotlivé typy zapojení, vhodnost jejich použití, výhody a nevýhody takovýchto zapojení, s důrazem na nepřímé měniče kmitočtu.

Třetí kapitola je věnována měniči Sinamics S120, představuji zde jeho technické specifikace a zejména způsob ovládání měniče pomocí obslužného software STARTER (verze 4.3). Pro měření a následnou analýzu dat je určena funkce TRACE tohoto programu. Zvláštní podkapitola je věnována matematickým funkcím, které jsou součástí funkce TRACE a v této práci byly při analýze naměřených hodnot často využívány.

Následuje kapitola, která je věnována praktickému vyhodnocení naměřených parametrů z měniče umístěného ve školní laboratoři E103, a to zejména prostřednictvím software Microsoft Excel (2010) a výše uvedených matematických funkcí.

Kapitola 5 analyzuje naměřená data získaná v rámci projektu ALFA, opět s využitím matematických funkcí a programu Microsoft Excel (2010).

Příloha A obsahuje tabulku se seznamem provedených měření a jejich vstupní parametry, veškeré změřené průběhy spojené s projektem ALFA jsou ve formátu *.trc a po exportu těchto dat také grafy ve formátu *.xlsx k dispozici v digitální podobě na přiloženém CD.

2. Měníče frekvence

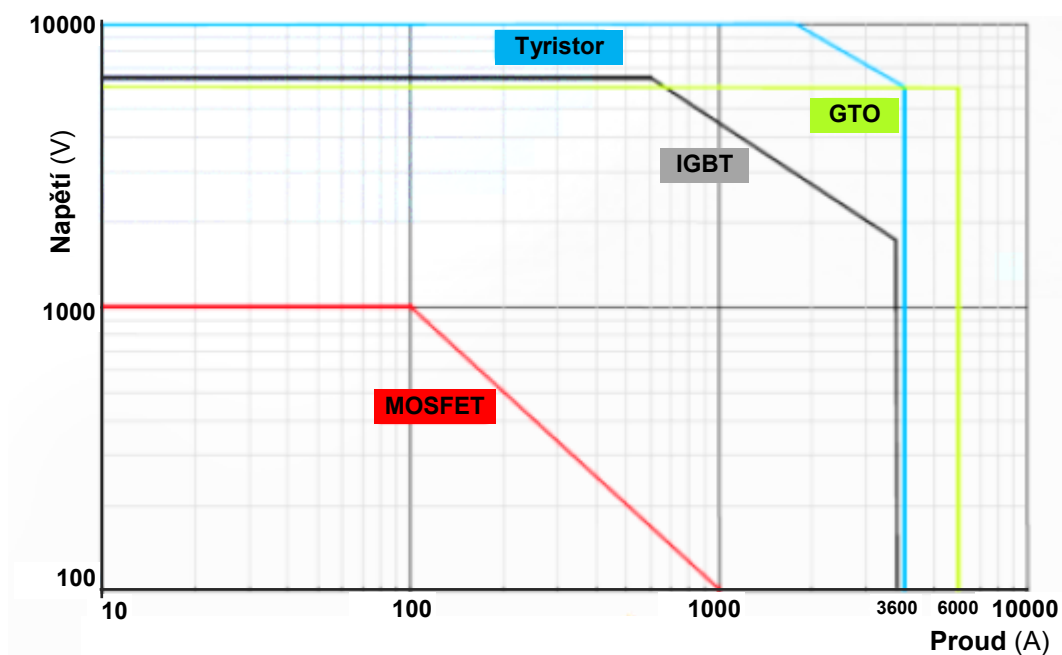
Měníč frekvence (kmitočtu) je takové zařízení, které umožňuje přenos energie mezi jeho vstupním a výstupním obvodem a tento přenos je spojen se změnou frekvence, ale poměrně často ho také doprovází regulace napětí.

Aby mohlo dojít k masivnějšímu rozvoji a použití měničů, předcházela tomu velký vývoj spínacích součástek v posledních letech, který velmi výrazně posunul parametry těchto prvků jak v oblasti jejich proudového a napětového namáhání, ale také v oblasti dynamických parametrů, tedy rychlosti sepnutí a vypnutí, strmosti nárůstu proudu (napětí) a také spínací frekvence.

Nejčastěji používanou součástkou ve výkonových měničích je IGBT tranzistor, který dominuje oblasti nízkých a středních výkonů, ale jeho parametry se co do výkonové zatížitelnosti neustále zvyšují.

Pro oblast menších výkonů se také uplatňují součástky typu MOSFET, pro oblasti vysokých a velmi vysokých výkonů se využívají spínače typu GTO a stále častěji také IGCT, setkáme se však i klasickým tyristorem.

Obr. 2.1 ukazuje možné napětové a proudové zatížení jednotlivých typů spínacích součástek.



Obr. 2.1 Spínací prvky a jejich proudová a napětová zatížitelnost [9]

Problematika měničů frekvence je poměrně rozsáhlá, zahrnuje oblasti od řízení měničů, volbu typu zapojení, volbu spínacích prvků, pokračuje přes problematiku elektromagnetické kompatibility a vlivu měniče na napájecí síť a okolí, způsoby odrušení, volbu typu chlazení měničů a dále pak regulaci připojených zařízení (motorů).

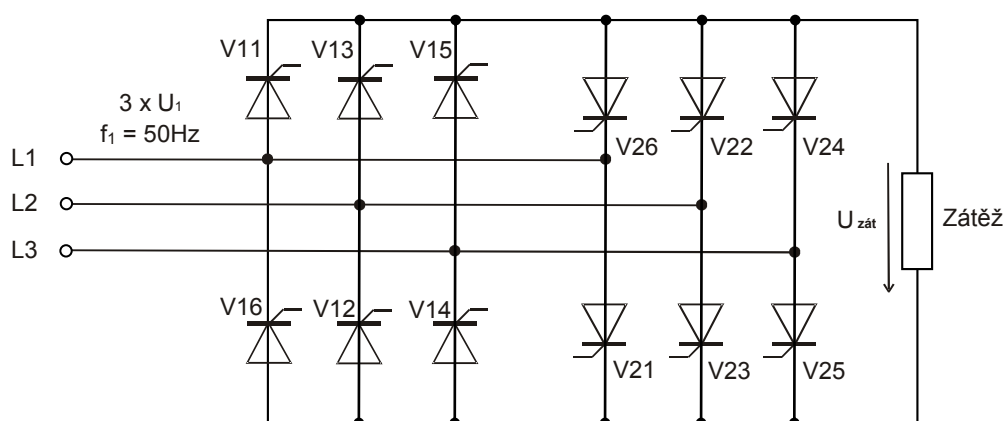
Podle způsobu zapojení vstupního a výstupního obvodu rozlišujeme dva základní typy měniče: přímý měnič frekvence a nepřímý měnič frekvence. Nepřímý měnič frekvence má širší pole uplatnění, dále je tedy této problematice věnováno více prostoru, než přímým měničům.

2.1. Přímý měnič frekvence

Přímé měniče kmitočtu vytvářejí křivku výstupního střídavého napětí o proměnném kmitočtu přímo, a to ze vstupní trojfázové sítě o průmyslovém kmitočtu.

Jsou možné dva způsoby zapojení přímých měničů, buď tzv. cyklokonvertory, ty jsou realizovány pomocí součástek s vnější komutací měniče, druhou možností je pak zapojení s využitím vypínatelných polovodičových součástek (s vlastní komutací).

Na obr. 2.2 je schéma zapojení jedné fáze cyklokonvertoru.



Obr. 2.2 Jedna fáze přímého měnič kmitočtu s vnější komutací (cyklokonvertoru) [3]

Využití těchto typů měničů je v oblasti napájení synchronních strojů s budícím vinutím, např. u pomaloběžných střídavých pohonů velkého výkonu.

Výstupní kmitočet přímého měniče kmitočtu je vždy nižší jak vstupní, v praxi lze dosáhnout do max. cca poloviční hodnoty vstupní frekvence.

Dynamika těchto měničů je horší, než u měničů nepřímých s napěťovým meziobvodem.

Výhodu cyklokonvertorů jsou nízké spínací ztráty, nevýhodou je ovšem značně nesinusový odběr síťového proudu, který provází velký odběr jalového výkonu na první harmonické a širokého spektra harmonických vyšších řádů.

2.2. Nepřímý měnič frekvence

U nepřímého měniče kmitočtu dochází k přeměně vstupního síťového napětí přes vstupní část, tou je vstupní měnič – buď usměrňovač, nebo pulzní usměrňovač, následuje mezilehlý obvod a poslední částí je výstupní měnič – střídač, ze kterého odebíráme výstupní střídavé napětí s proměnnou frekvencí a regulovaným napětím. Jako mezilehlý obvod se používá stejnosměrný obvod. Vstupním obvodem tedy dochází k usměrnění vstupního střídavého napětí (proudu) s frekvencí f_1 , dále se stejnosměrným mezilehlým obvodem vyfiltruje a výstupním měničem se rozstřídá na napětí o požadované výstupní frekvenci f_2 a s požadovanou hodnotou efektivního (okamžitého) napětí.

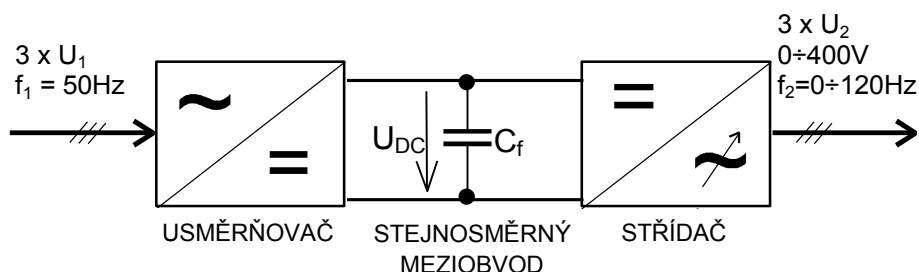
Podle použitého prvku ve stejnosměrném mezilehlém obvodu pak rozlišujeme dva typy měniče kmitočtu:

- Měníče kmitočtu napětového typu – s kondenzátorem
- Měníče kmitočtu proudového typu – s tlumivkou

2.2.1. Nepřímé měniče kmitočtu napětového typu

Základní blokové schéma měniče kmitočtu napětového typu je na obr. 2.3, sestává z usměrňovače na vstupní straně a střídače na výstupní straně. Jako stejnosměrný obvod je použit kondenzátor, jehož kapacita je poměrně velká (až jednotky tisíc μF).

SS obvod se díky tomuto kondenzátoru chová vzhledem ke střídači jako zdroj napětí a provádí filtraci výstupního napětí usměrňovače. S ohledem na zpětné diody použité u střídače, může být napětí U_{DC} pouze jedné polarity.

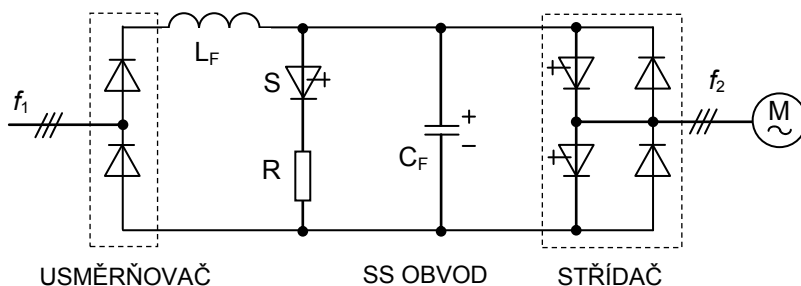


Obr. 2.3 Základní blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu napětového typu [3]

Výstupní obvod – střídač je používán napětový, v zapojení jednofázovém nebo třífázovém. Nejčastěji se setkáváme s třífázovým zapojením, se spínači s vlastní komutací.

Vstupní obvod – usměrňovač může být jak zapojení jednofázovém, tak třífázovém, ve spojení můstkovém, nebo do uzlu, s různým typem spínacích prvků (s vnější nebo vlastní komutací).

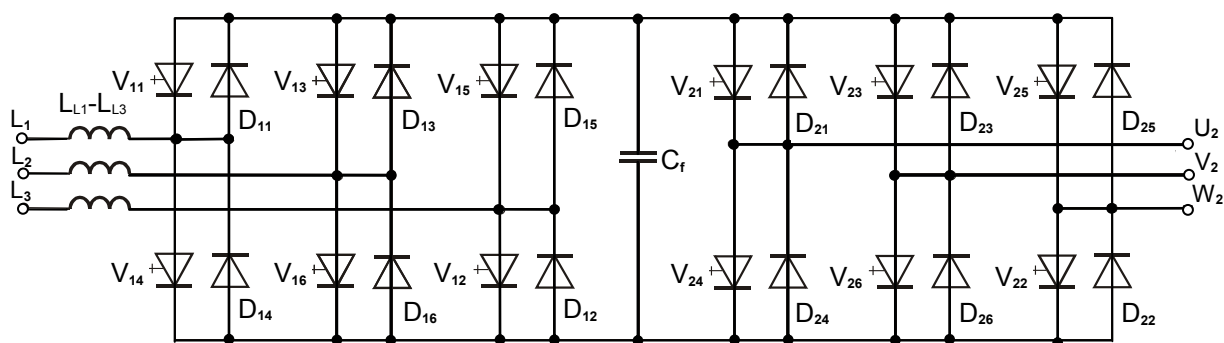
Na obr. 2.4 je příklad nejjednoduššího zapojení s diodovým můstkem. Pokud je v tomto zapojení požadována rekuperace energie ze strany střídače, např. při brzdění střídavého motoru, pak je rekuperovaná energie mařena v odporu R .



Obr. 2.4 Zapojení nepřímého měniče kmitočtu napětového typu s diodovým můstkem [2]

Naopak nejdokonalější variantou je měnič s pulzním napěťovým usměrňovačem na vstupu, který je schopen zajistit čtyřkvadrantový provoz měniče kmitočtu při téměř sinusovém odběru proudu ze sítě a účinnkem $\cos \varphi_{(I)}$ blízkém jedné. Zapojení je zobrazeno na obr. 2.5.

Obvodové schéma vstupního pulzního usměrňovače a výstupního střídače je totožné. Oba měniče pracují s vlastní komutací. Kondenzátor meziobvodu reprezentuje pro oba měniče zdroj stejnosměrného napětí U_d , který umožňuje průchod obou polarit proudu z měničů, takže schéma pracuje jako čtyřkvadrantové. Pro správnou funkci musí být na vstupu pulzního usměrňovače síťové tlumivky $L_{L1} \div L_{L3}$, které slouží jako filtr vstupního proudu a zároveň potlačují šíření spínacího zvlnění do sítě. Síťové tlumivky rovněž umožňují zvýšení napětí meziobvodu nad amplitudu napětí napájecí sítě.



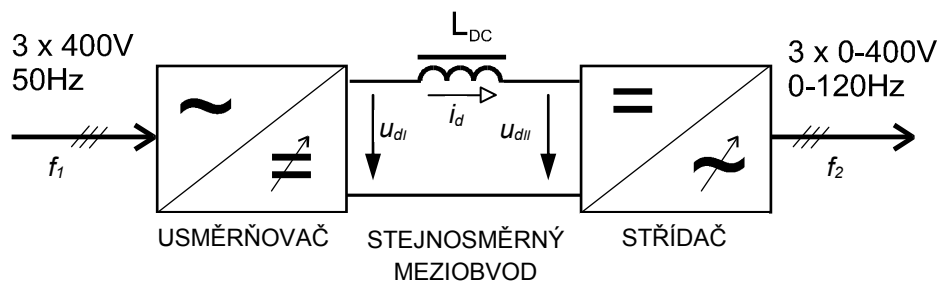
Obr. 2.5 Zapojení nepřímého měniče kmitočtu napěťového typu s pulzním usměrňovačem [3]

Jelikož je po převážnou část periody výstupního napětí střídače (vstupního napětí usměrňovače) proud měniče spojitý, dochází při vypnutí kteréhokoliv spínače převážně ke komutaci proudu na protilehlou nulovou diodu v dané větvi. Tento děj nazýváme tvrdým spínáním (tvrdou komutací) a je příčinou řady problémů při využívání měničů kmitočtu napěťového typu. Při průchodu střídavého proudu okolím nuly, příp. při velmi malých proudech zátěže, pracuje střídač v režimu přerušovaných proudů a problémové děje spojené s komutací nevznikají.

2.2.2. Nepřímé měniče kmitočtu proudového typu

Nepřímé měniče proudového typu nacházejí uplatnění v oblasti pohonů velkých výkonů, kde je požadován širší regulační rozsah, příp. vyšší kmitočty, které není možno dosáhnout cyklokonvertory.

Základní blokové schéma měniče kmitočtu proudového typu je na obr. 2.6, jeho části tvoří usměrňovač na vstupní straně, střídač na výstupní straně a jako stejnosměrný obvod je použita tlumivka L_{DC} .



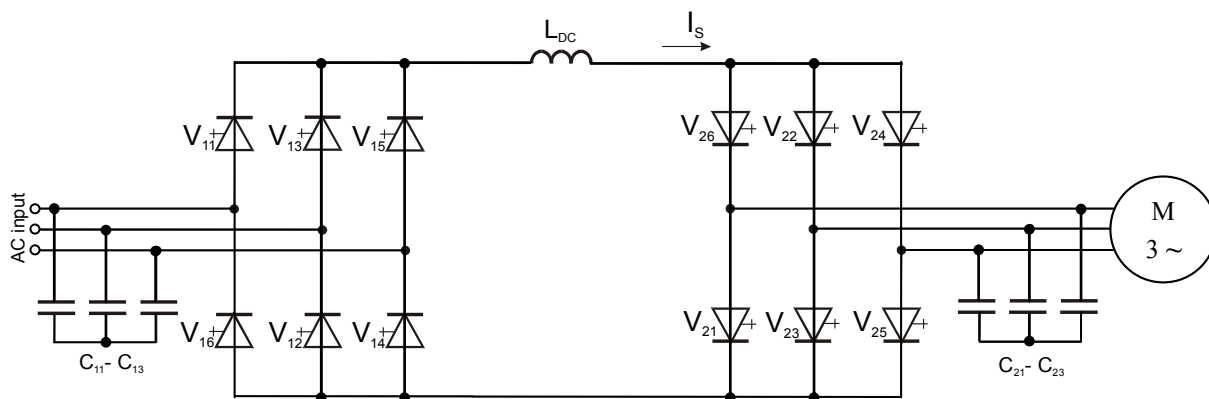
Obr. 2.6 Základní blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu proudového typu [3]

Velikost tlumivky se pohybuje v řádu jednotek mH a při komutacích střídače se vzhledem k němu chová jako zdroj proudu. Proud z usměrňovače je tlumivkou vyhlazen a má neproměnný smysl. Její důležitou funkcí je výměna jalového výkonu mezi zátěží a stejnosměrným obvodem. Umožňuje totiž rychlé změny napětí u_{dII} , nezávisle na u_{dI} a to i při jeho změně smyslu.

Vstupní obvod – usměrňovač může být jak v zapojení jednofázovém, tak třífázovém, ve spojení můstkovém, nebo do uzlu. Při požadavku na energetickou dvousměrnost postačuje dvoukvadrantové zapojení usměrňovače s reverzací napětí. Nejčastějším zapojením je obvykle plně řízený 6 - ti pulzní můstkový usměrňovač s vnější komutací. Při potřebě vyloučení nežádoucí 5. a 7. harmonické se používají 12 - ti pulzní zapojení. Řízení proudu a napětí zátěže střídače může být pouze amplitudové. Nejlepšího účinku se dosahuje zapojením pulzního proudového usměrňovače na vstupu.

Výstupní obvod – střídač je používán proudový, obvykle v třífázovém zapojení, ale lze použít i zapojení jednofázové. Použité spínače jsou obvykle s vlastní komutací, řízení pulsně šířkové modulované, nebo obdélníkové. Pro zátěže, které nevyžadují odběr jalového proudu, ale naopak jsou jeho zdrojem (např. synchronní motor), lze použít taktěž proudové střídače s vnější komutací. (Klasický řízený usměrňovač ve střídačovém chodu).

S nástupem moderních spínacích prvků došlo k určité modernizaci těchto měničů a nejběžnějším současným typem zapojení je vyobrazeno na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Zapojení nepřímého měniče kmitočtu proudového typu s vypínatelnými součástkami [3]

Toto zapojení využívá vypínatelné spínače, ve vstupním a výstupním obvodu mohou být tyristory GTO s odlehčovacími (snubber) obvody, IGBT tranzistory s oddělovacími diodami, nebo symetrické IGCT tyristory. Podmínkou správné funkce obvodu však je, aby spínací součástky byly zpětně závěrné, tj. symetrické. Měnič musí být navíc doplněn kapacitními bateriemi, jednak provádějí filtraci vstupního i výstupního proudu, ale zajišťují taktéž akumulaci energie ve vypínaných fázích.

Vstupním obvodem je zde výše zmíněný pulsní usměrňovač proudového typu.

Vstupní i výstupní proud těchto měničů může být při vhodném řízení harmonický (sinusový), zatížený pouze středofrekvenčním rušením odvozeným od spínacího kmitočtu.

Hlavní výhodou tohoto typu měničů je tedy absence harmonických složek (5., 7., 11., 13., ...) ve vstupním proudu, tedy absence nízkofrekvenčního rušení ze vstupní strany. Totéž je možno říci o výstupním proudu, kdy má harmonický průběh proudu kladný vliv na chování a ztráty motoru, omezí se vliv napájecích kabelů. Podstatnou výhodou je rovněž možnost provozovat měnič s řízeným účinníkem a eliminovat jalovou složku výkonu odebíranou ze sítě.

Dalšími výhodami jsou rychlejší reakce na požadavky řízení, která je omezena v podstatě pouze kapacitou výstupní kondenzátorové baterie (na rozdíl od konvenčních proudových střídačů, kdy jsme omezeni délkou komutačního děje a velkou časovou konstantou L_{DC}) a možnost úplné modulace výstupního napětí (střídač s komutačními obvody má možnosti modulace omezené a je nutno řídit proud meziobvodu I_S). Uvedená konfigurace měniče proudového typu také dosahuje velmi kvalitní křivku výstupního napětí, resp. vstupního proudu, ovšem za cenu výrazného zvýšení spínacích ztrát. [3]

2.3. Metody řízení rychlosti AM napájeného z měniče kmitočtu

Výstupní parametry měniče frekvence, využívané k řízení AM, lze provádět třemi základními způsoby:

- skalární řízení U/f
- vektorové řízení
- přímé řízení momentu motoru

2.3.1. Skalární řízení U/f

První metoda, která vychází ze zjednodušeného matematického modelu motoru je metoda skalární U/f , tj. řízení při konstantním poměru napětí a kmitočtu na vstupu AM. Tato metoda se používá v aplikacích, které nevyžadují zcela přesné řízení otáček motoru a pracují zejména v ustáleném stavu. Nehodí se pro dynamicky náročné operace.

Při řízení je třeba dodržet podmínku konstantního magnetického toku motoru, která vychází z rovnice:

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot I_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} \quad (2.1)$$

Po derivaci:

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot I_1 + k \cdot f_1 \cdot \bar{\Psi}_1 \quad (2.2)$$

Odpor statoru zanedbáme a získáme rovnici pro konstantní magnetický tok:

$$U_1 = k \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \rightarrow \Psi_1 \approx \frac{U_1}{f_1} = konst. \quad (2.3)$$

Podmínka konstantního magnetického toku platí pro $f < 50$ Hz, pro f vyšší již nelze zachovat konstantní poměr U/f , protože motor lze napěťově zatěžovat jen do určité míry. Proto se pro $f > 50$ Hz dodržuje podmínka konstantního statorového napětí $U_1 = konst.$, kdy je konstantní výkon motoru. Pak platí:

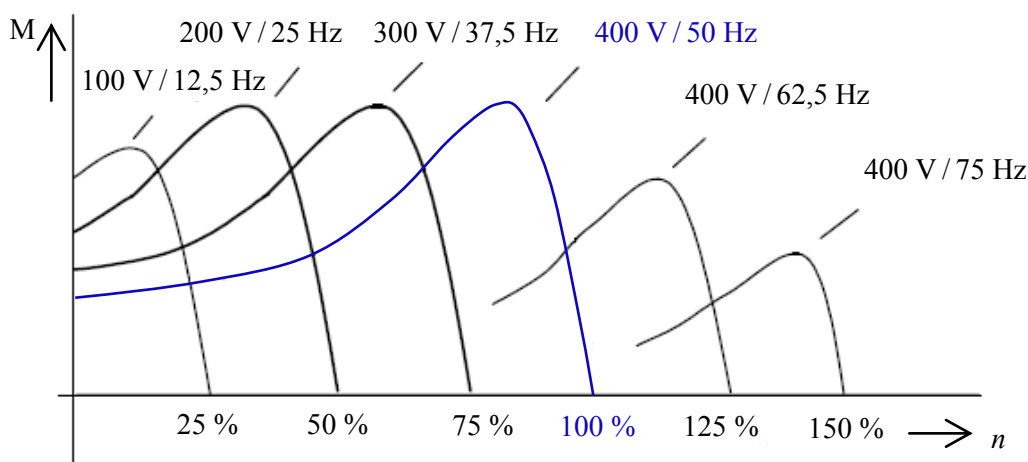
$$U_i = U_1 = k \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \rightarrow \Psi_1 \approx \frac{1}{f_1} \quad (2.4)$$

Proud I_1 je také konstantní:

$$M \approx I_1 \cdot \Psi_1 \rightarrow M \approx \frac{1}{f_1} \quad (2.5)$$

$$P = U_1 \cdot I_1 = konst. \quad (2.6)$$

Momentové charakteristiky motoru pro různé poměry U/f jsou zobrazeny na obr. 2.8, tvar jednotlivých momentových charakteristik zůstává zachován, ale pro různě velké frekvence jsou jednotlivé charakteristiky vzájemně posunuty. Z obr. 2.8 je patrné, že v oblasti malých kmitočtů dochází k poklesu momentu motoru, a to vlivem úbytku napětí na statorovém vinutí R_1 , který už zde nelze zanedbat. Stejně tak v oblasti kmitočtů vyšších jak 50 Hz dochází k poklesu momentu motoru, viz. podmínka $U_1 = konst.$



Obr. 2.8 Momentové charakteristiky motoru při skalárním řízení U/f [4]

Tato metoda řízení se nazývá také frekvenčně napětíové řízení, jeho obdobou je pak frekvenčně proudové řízení.

Skalární metoda řízení může být realizována buď v otevřené (až 90 % všech průmyslových aplikací), nebo uzavřené smyčce, tj. buď bez, nebo se zpětnou vazbou.

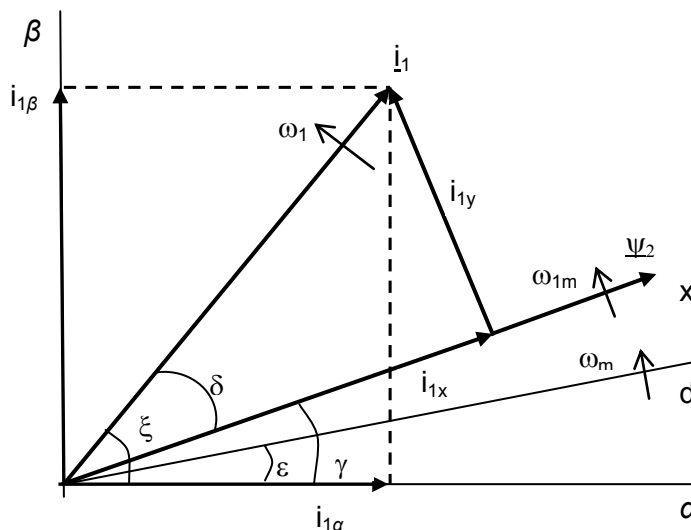
2.3.2. Vektorové řízení

Metoda vektorového řízení vychází z úplného matematického modelu motoru, zahrnující nejen ustálený stav motoru, ale také chování motoru v přechodových dějích. Stěžejní podmínkou této metody je oddělení regulačních obvodů pro moment a magnetický tok a to tak, aby se navzájem neovlivňovaly. K řízení je třeba vyhodnocovat nejen velikost vektoru magnetického toku, ale i polohu natočení vektoru.

Princip vektorového řízení spočívá v rozkladu prostorového vektoru statorového proudu na dvě navzájem kolmé složky v rotujícím souřadnicovém systému $[x,y]$ (pro AM motor). Složky prostorového vektoru statorového proudu pak určují magnetizaci stroje a jeho moment a souvisí tedy s jalovým a činným výkonem stroje.

Výhodou této metody oproti skalárnímu řízení jsou výrazně lepší dynamické vlastnosti, nevýhodou býval požadavek na větší výpočetní výkon procesoru, který je v dnešní době prakticky odstraněn. Běžně lze dosáhnout spínacích frekvencí 10 až 20 kHz.

Příklad rozkladu vektoru statorového proudu na 2 složky i_{1x} a i_{1y} pro vektorové řízení asynchronního motoru je na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Složky prostorového vektoru statorového proudu AM [6]

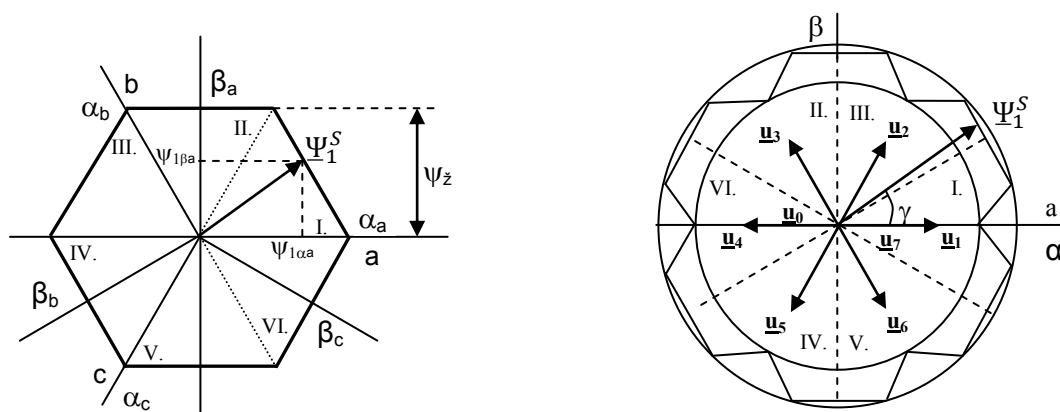
2.3.3. Přímé řízení momentu

Principem metody přímého řízení momentu je dvouhodnotová regulace okamžité hodnoty momentu motoru a dvouhodnotová regulace statorového magnetického toku.[5] Reguluje se přímo moment v regulačním pásmu a magnetický tok po zadané křivce. K regulaci se používají hysterezní regulátory, které zajišťují, aby se skutečné hodnoty magnetického toku a momentu pohybovaly uvnitř hysterezního pásma. Řízení probíhá přímo ve statorových souřadnicích. Realizace probíhá spínáním vhodné kombinace spínačů frekvenčního měniče, na jehož výstupu získáme napět'ové vektory \underline{u}_0 až \underline{u}_7 , kde vektory \underline{u}_0 a \underline{u}_7 jsou tzv. nulové vektory, absolutní hodnota napět'ových vektorů \underline{u}_1 až \underline{u}_6 dosahuje $2/3$ hodnoty napětí U_d (ve SS meziobvodu).

V praxi se používá několik metod přímého řízení momentu stroje, z nichž nejznámější jsou:

- Depenbrockova metoda
- Takahashiho metoda

Trajektorie koncového bodu vektoru magnetického toku se pohybuje podle zvolené metody buď po šestiúhelníku (Depenbrockova metoda), nebo v mezikruží (Takahashiho metoda), viz. obr. 2.10.



Obr. 2.10 Pohyb trajektorie koncového bodu vektoru magnetického toku

a) Depenbrockova metoda; b) Takahashiho metoda [7]

Metoda přímého řízení momentu motoru se oproti vektorovému řízení vyznačuje svou jednoduchostí, rychlé změny momentu motoru, kterých lze dosáhnout předurčuje tuto metodu k dynamicky náročnějším operacím. Klade však větší požadavky na řídicí procesor, s běžnými mikroprocesory např. INTEL 80186, 80196 KC dosahuje spínacích frekvencí do 2 kHz, při požadavku na vyšší spínací frekvence je třeba použít signálové procesory.

2.4. Měníč frekvence a rekuperace elektrické energie motoru

Pojem rekuperace představuje proces přeměny energie, např. energie kinetické vznikající při brzdění na zpět využitelnou energii elektrickou, která je buď vracena do napájecí sítě, případně ukládána do akumulátorů, nebo jiných zásobníků energie. [8]

Při požadavku na snížení otáček motoru, nebo v případě přetáčení zátěže vyvíjejí měniče frekvence brzdňý moment. V okamžiku, kdy motor vytváří brzdňý moment, pracuje jako generátor indukující napětí, tj. že přijímá energii kinetickou od své zátěže a vrací ji jako energii elektrickou zpět do svého napájecího zdroje. Pokud měnič energii generovanou motorem přijímá, tato energie se jeví jako proud stejnosměrného meziobvodu, ale s opačným znaménkem.

Pokud je vstupní usměrňovač neřízený (diodového typu), není schopen pracovat s proudem opačného toku, pak tento proud nabíjí kondenzátory stejnosměrného meziobvodu. Tímto se však zvyšuje také napětí meziobvodu, proto jsou měniče vybaveny měřením napětí meziobvodu a ochranou proti přepětí. Pokud by nabíjení kondenzátorů nebylo omezeno, mohlo by dojít ke zničení celého měniče. Dále je tento typ měniče vybaven tzv. brzdňým odporem, který chrání měnič při nadměrném brzdňém momentu, vznikající např. při dynamickém brzdění. Pak je přebytečná energie mařena právě v brzdňém odporu.

Při požadavku na rekuperaci elektrické energie zpět do napájecí sítě, se využívají tzv. plně rekuperační měniče, které díky aktivnímu pulsnímu usměrňovači na vstupu měniče umožňují využití energie vznikající brzděním. Příklad zapojení plně rekuperačního měniče je na obr. 2.5. Také musí být splněna podmínka, že napájecí síť je schopna rekuperovanou energii přijmout. V případě splnění této podmínky pak pohon umožňuje dodávat do sítě proud blízký harmonickému a s účínkem blízkým k 1.

3. Měníč frekvence Sinamics S120

Firma Siemens vyvíjí celou řadu měničů frekvence, určené pro různé typy motorů, nabízí široký výběr co do typu provedení (skříňové, vestavěné, modulární a kompaktní), pro velmi široký rozsah výkonů, pro nízká i vysoká napětí, pro více typů motorů, s různým typem řízení a určené pro nejrůznější aplikace.

Základním rozdělením měničů firmy Siemens jsou měniče s označením:

- SINAMICS Sxxx (Special) určené pro energeticky či dynamicky náročné aplikace
- SINAMICS Gxxx (General) určené pro základní aplikace

Dále firma nabízí sofistikovaný způsob propojení měničů s dalšími produkty, klade důraz na flexibilitu, rozmanitost funkcí a efektivitu, od návrhu pohonu, přes jeho uvádění do provozu, až po pohodlnou obsluhu.

3.1. Základní vlastnosti měniče Sinamics S120

Jedná se o nízkonapěťový modulární frekvenční měnič, který je určen pro náročné aplikace jak v oblasti přesného řízení rychlosti a momentu pohonů s vysokou dynamikou, tak pro polohování v jedné či více osách.

Obvyklými aplikacemi tohoto měniče jsou převážně pohony různých strojů, např. balící, textilní, dřevoobráběcí, sklářské stroje, lisy, děrovačky, montážní a testovací linky, manipulátory a zdvihací zařízení, atd.

Jeho výkonový rozsah je velmi široký, od 0,12 kW do 4500 kW a je tedy nabízen ve všech čtyřech variantách provedení (skříňový pro nejvyšší výkony, modulární, kompaktní a vestavný pro nižší výkony).

Umožňuje spojení jak se synchronními, tak asynchronními motory.

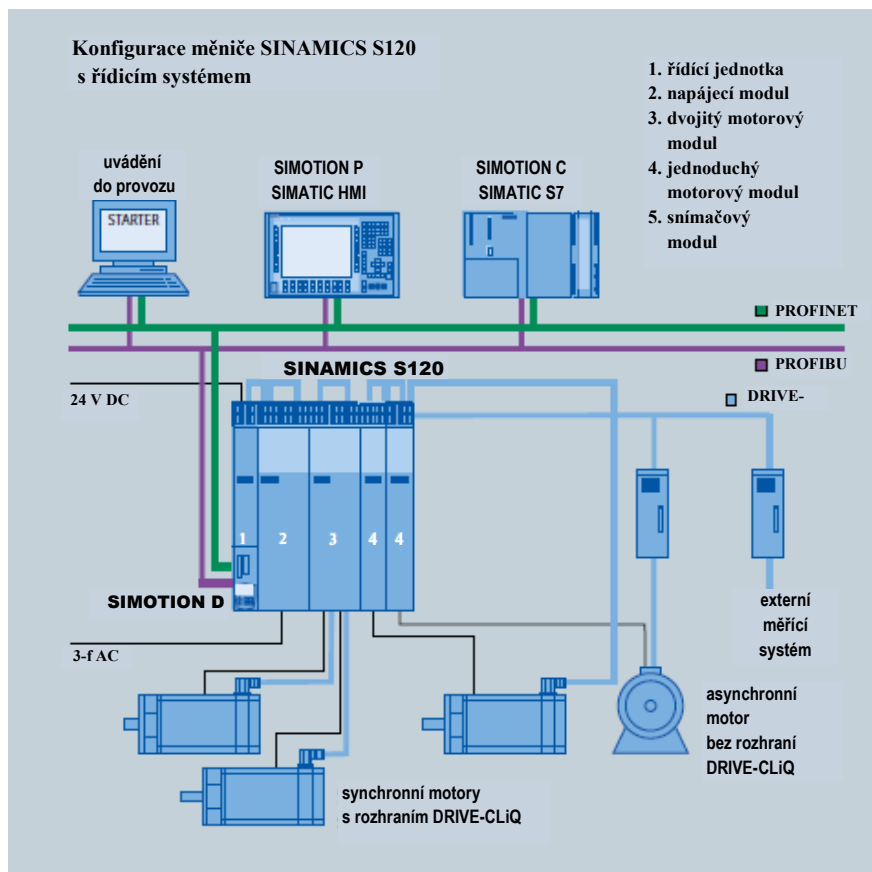
Typické spojení frekvenčního měniče Sinamics S120 s ostatními prvky pohonu a dalšími podpůrnými prostředky je zobrazeno na obr. 3.1.

Všechny měniče SINAMICS S120 se skládají z:

- napájecího modulu
- motorového modulu
- řídicí jednotky.

U jednoosých měničů (tzv. AC/AC měničů) je napájecí a motorový modul sloučen do jednoho dílu. Komunikace mezi těmito funkčními celky je zajišťována proprietární sběrnici DRIVE-CLiQ.

Stejnoseměrný meziobvod napájený z napájecího modulu může zásobovat více motorových modulů s invertory. Motorové moduly s malými výstupními proudy se vyrábějí za účelem úspory místa i ve dvojitém provedení.



Obr. 3.1 Blokové schéma spojení měniče S120 s dalšími prvky pohonu [1]

Napájecí moduly jsou k dispozici ve trojím provedení:

- Basic Line Module (bez rekuperace)
- Smart Line Module (s neřízenou rekuperací a nekonstantním napětím meziobvodu)
- Active Line Module (s řízenou rekuperací a kvalitní regulací napětí meziobvodu)

Řídicí jednotky umožňují řízení několika pohonů v režimech:

- U/f
- vektor
- servo

Disponují i bezpečnostními funkcemi vhodnými pro strojní aplikace.

Veškerá inteligence frekvenčního měniče je soustředěna do řídicí jednotky a motorový modul je jen výkonový díl řízený z této jednotky přes sběrnici DRIVE CLiQ. Současně jsou řídicí jednotky

vybaveny rozhraními pro nadřazený systém, s nímž mohou komunikovat isochronním, tedy velmi rychlým a především časově přesným protokolem.

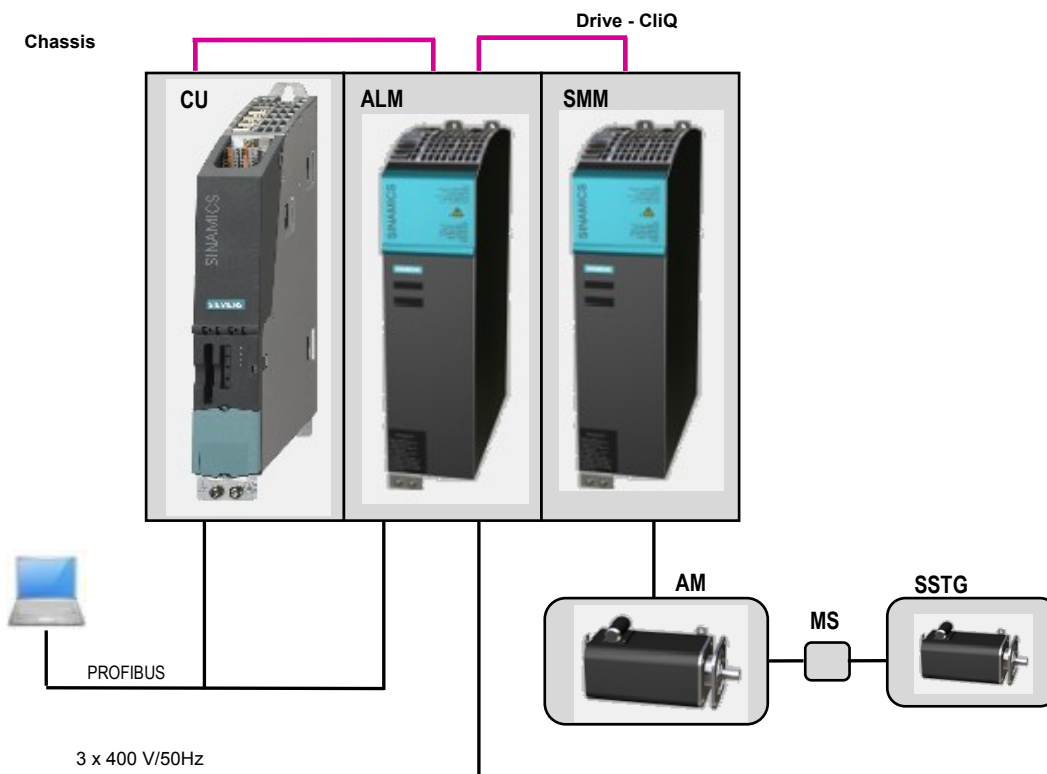
Prostřednictvím sítí Profinet či Profibus DP lze frekvenční měniče propojovat navzájem a s různými řídicími systémy.

Hlavní výhody měniče Simamics S120:

- Univerzální použití v dynamicky náročných jednoosých i víceosých aplikacích
- Flexibilita daná modulární výstavbou.
- Široké výkonové spektrum.
- Jednoduché polohování přímo v měniči.
- Volné funkční bloky pomocí DCC (Drive Control Chart).
- Bohatá nabídka bezpečnostních funkcí.
- Několik variant chlazení.

3.2. Konfigurace pohonu v laboratoři E103

V laboratoři, kde probíhalo měření byla následující konfigurace zapojení pohonu:



Obr. 3.2 Konfigurace měřeného pohonu v laboratoři

Měnič je v provedení „šasí“ a tvoří ho spojení následujících komponent:

- **CU** – *Central unit* - řídicí jednotka CU320, typ 6SL3040-0MA00-0AAx
+ TB 30 – karta, součást CU320, typ 6SL3055-0AA00-0TA
- **ALM** - *Active line module* – vstupní pulsní usměrňovač a filtr, typ 6SL3130-7TE21-6AAx
(filtr – DC link 600V)
- **SMM** – *Single motor module* – výstupní střídač typ 6SL3120-1TE21-0AAx

Propojení jednotlivých jednotek je realizováno pomocí sběrnice Drive CLiQ, řízení zabezpečuje řídicí jednotka, která po sběrnici PROFIBUS (ETHERNET...) umožňuje obsluhu připojených periférií. Napájení měniče je síťové.

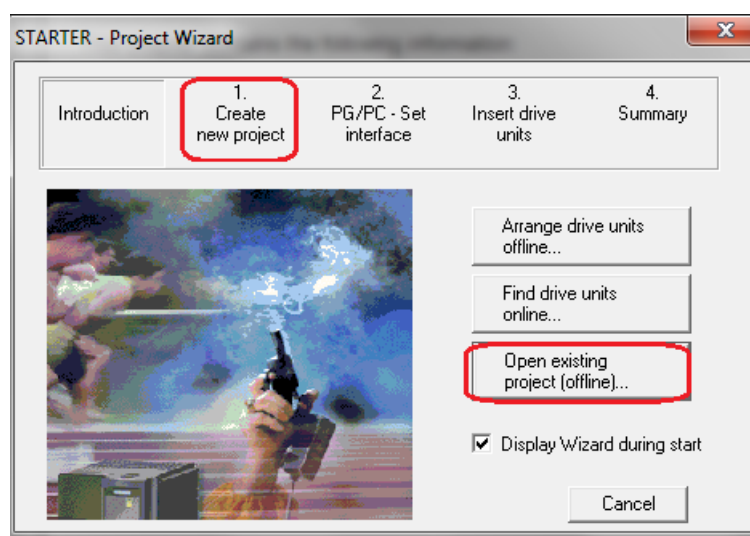
Na výstupní svorky střídače je připojen asynchronní motor (**AM**), ten je přes mechanickou spojku (**MS**) spojen se stejnosměrným tachogenerátorem (**SSTG**). Tachogenerátor slouží jako zátěž pro asynchronní motor v motorickém režimu, nebo jako generátor v generátorickém režimu.

3.3. Software STARTER pro obsluhu měniče Sinamics S120

Software STARTER poskytuje podporu pro nastavení parametrů měničů včetně jejich grafické prezentace. Součástí je též funkce importu štičkových dat z motorů a natažení aktuální konfigurace dle skutečného stavu hardware.

Integrované testovací funkce podporují optimální nastavení pohonů a grafická znázornění průběhů veličin umožňují jednoznačnou diagnostiku a rychlou orientaci uživatele. [1]

Prvním krokem po spuštění programu je buď otevření stávajícího projektu, nebo vytvoření projektu nového, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 Úvodní krok po spuštění ovládacího programu

O tom, jak vytvořit nový projekt, byly publikovány práce v předchozích letech, zaměřím se zde proto na funkce programu, které jsou stěžejní pro tuto diplomovou práci.

Program má dva provozní režimy, a to režim online a druhým je offline. V režimu online jsou přístupné všechny funkce programu, režim offline je vyhrazen pro přípravování projektu, nastavování parametrů signálu před měřením a pro případné zpracovávání naměřených signálů. Lze ho tedy s výhodou využít i v době, kdy nemáme možnost být přímo připojeni k měniči online.

3.3.1. Vnitřní parametry měniče

Vždy pro zvolenou kombinaci jednotlivých komponent (modulů), tvořící měnič, je v ovládacím programu nabízeno široké spektrum parametrů, které je možné v úvodní fázi spouštění ovládacího programu nastavit a následně je možné tyto parametry měřit, dále upravovat a analyzovat je. S jejich pomocí tak získáváme přehled o regulačních dějích pohonu.

Veškeré možné parametry jsou pro daný modul (např. ALM, CU320, VECTOR) zobrazeny v tzv. **Expert listu**, který je dostupný na hlavní obrazovce programu, v levé části obrazovky, po „rozbalení“ nabídky u požadovaného modulu. Počet nabízených parametrů je značný (např. pro modul ALM je nabízeno 230 a pro modul VECTOR výběr až z 641 parametrů).

Příklad Expert listu pro jednotku ALM je na obr. 3.4.


Výběr z těchto parametrů pro měření je popsán v následující kapitole 3.3.2.

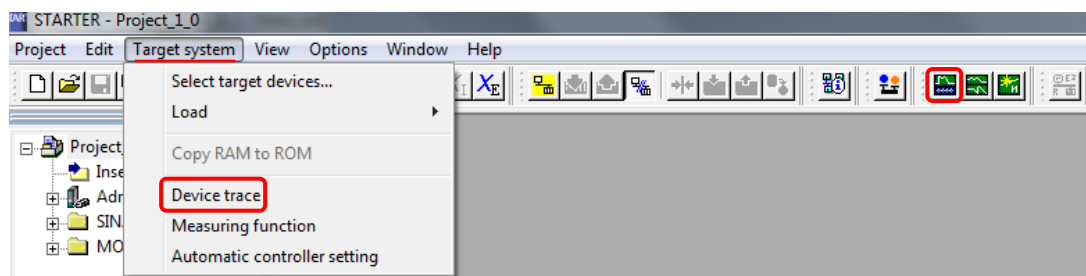
Parameter	Parameter text	Offline value ALM	Unit	Mod
All	All	All	All	All
142 r2121	Counter, alarm buffer changes	0	-	
143 r2122[0]	Alarm code	0	-	
144 r2123[0]	Alarm time received in milliseconds	0	-	
145 r2124[0]	Alarm value	0	-	
146 r2125[0]	Alarm time removed in milliseconds	0	-	
147 p2126[0]	Setting fault number for acknowledge mode	0	-	Oper
148 p2127[0]	Sets acknowledgment mode	[1] Acknowledgme...	-	Oper
149 p2128[0]	Selecting fault/alarm code for trigger	0	-	Oper
150 r2129	CO/BO: Trigger word for faults and alarms	0H	-	
151 r2130[0]	Fault time received in days	0	-	
152 r2131	CO: Actual fault code	0	-	
153 r2132	CO: Actual alarm code	0	-	
154 r2133[0]	Fault value for float values	0	-	
155 r2134[0]	Alarm value for float values	0	-	
156 r2135	CO/BO: Status word faults/alarms 2	0H	-	
157 r2136[0]	Fault time removed in days	0	-	
158 r2138	CO/BO: Control word faults/alarms	0H	-	

Obr. 3.4 Expert list – jednotka ALM

3.3.2. Funkce TRACE

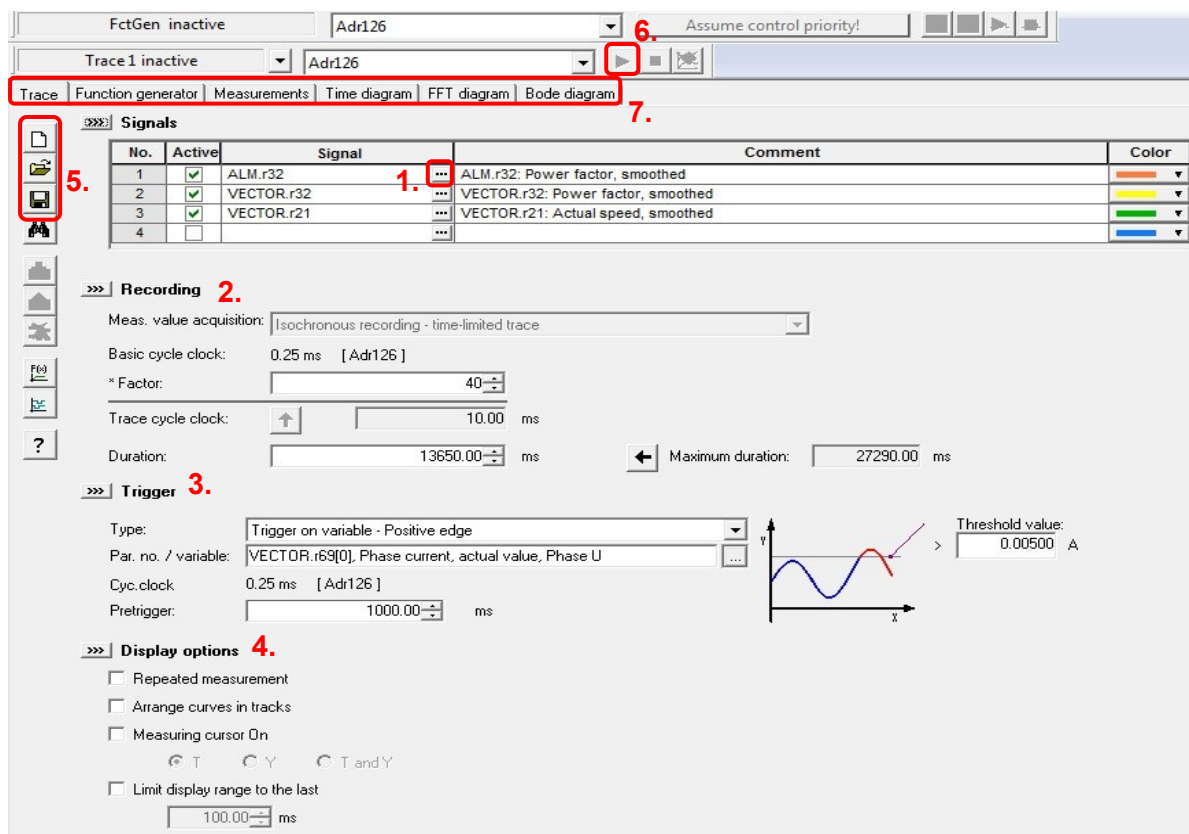
Po otevření stávajícího, nebo vytvoření nového projektu je možno přejít k funkci **Trace**, která umožňuje zaznamenávat vybrané parametry měniče a provádět s nimi další operace.

Výběrem záložky *Target system* na hlavním panelu programu a volbou položky *Device trace*, nebo stiskem ikony  se spustí funkce *Trace*, viz obr. 3.5.




Obr. 3.5 Spuštění funkce *Trace*

Pokud je funkce **Trace** aktivní, tak jak je vidět na obr. 3.6, lze nyní vybrat měřené parametry a nastavit další možnosti.



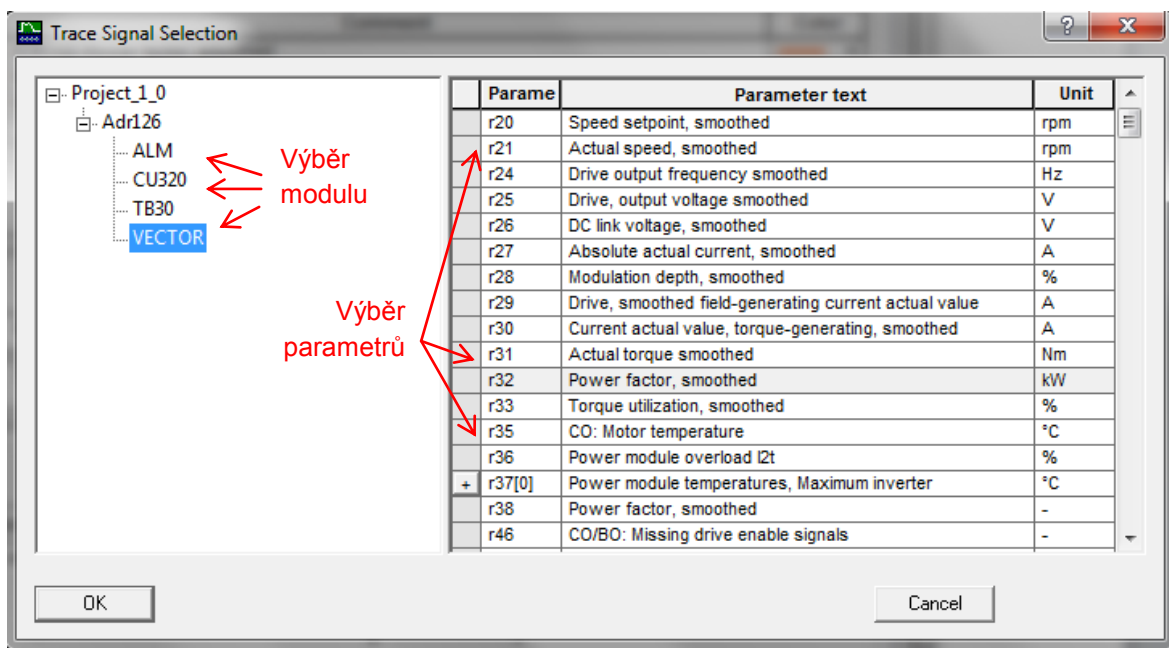
Obr. 3.6 Možnosti funkce *Trace*

1. Výběr měřících signálů:

Před započítím měření vybereme požadované měřené signály, a to stiskem na ikonu , následně vybíráme z nabídky, která je zobrazena na obr. 3.7.

Pro danou konfiguraci měniče jsou nabízeny možné varianty jednotek a pro příslušnou jednotku její dostupné parametry. Obr. 3.7 představuje konfiguraci v laboratoři E103, v době měření.

Maximální možný počet měřených signálů jsou 4 v případě vektorového řízení pohonu, nebo 8 u řízení typu servo, ale se zvyšujícím se počtem signálů klesá maximální možná doba záznamu, ovlivněná taktéž vzorkovací frekvencí.



Obr. 3.7 Nabídka možných měřených signálů

Volíme tedy např. z modulu VECTOR (vektorové řízení) parametr č. 32, parametr č. 21 a třetí parametr z modulu ALM (vstupní usměrňovač) parametr č. 32.

2. Nastavování doby měření:

Podle počtu zvolených parametrů (signálů) a podle zvolené vzorkovací frekvence je automaticky vypočítána maximální doba měření. Pokud je požadován měřicí čas kratší, než je maximální dovolený, nastavujeme jej v poli *Duration*.

Vzorkovací frekvenci lze nastavit pomocí hodnoty *Factor*, kde maximální hodnota 40 odpovídá nejnižší možné *f_{vz}* a minimální hodnota 1 odpovídá nejvyšší možné *f_{vz}*.

3. Nastavování spouštění:

Pro různé možnosti spouštění signálu slouží *Trigger*. Můžeme vybrat např. spouštění náběžnou hranou signálu, sestupnou hranou signálu, překročením nastaveného limitu apod., nebo nahrávání začne bezprostředně po stisku tlačítka start. Dále volíme parametr spuštění, tím je např. aktuální hodnota fázového proudu.


4. Možnosti zobrazování:

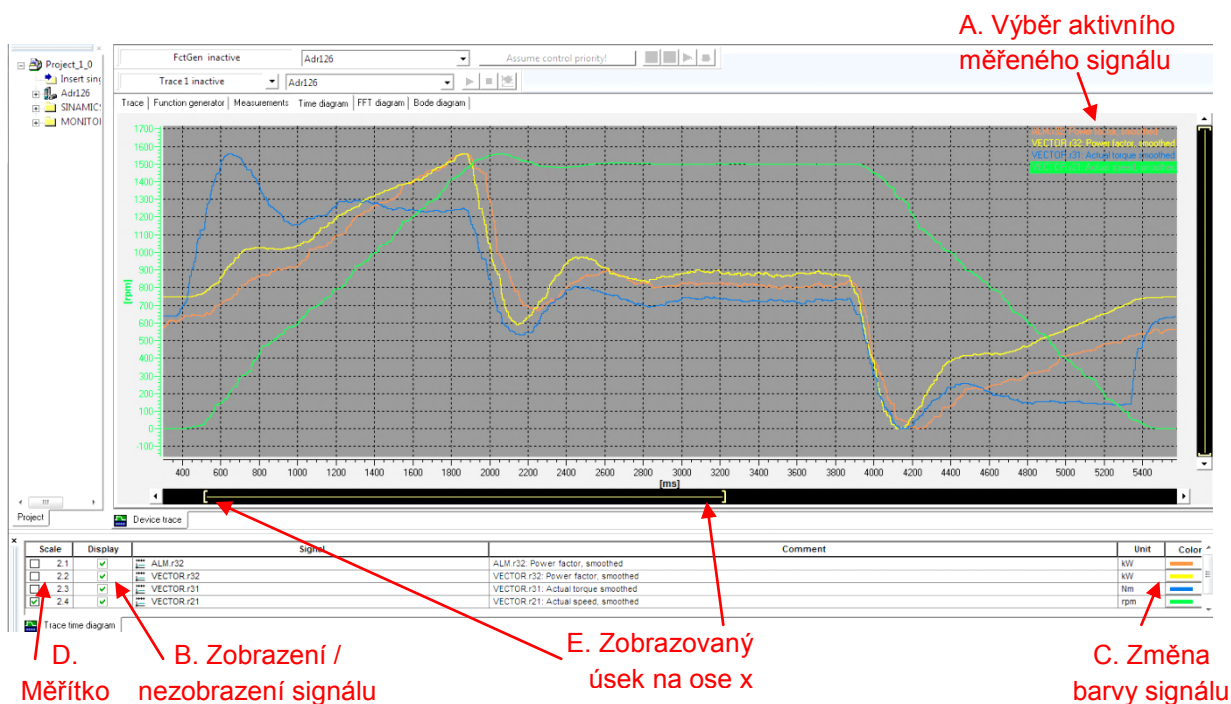
Lze zvolit opakované měření, uspořádání křivek v grafu, atd.

5. Reset, otevírání, ukládání katalogů:

Parametry funkce *trace* je možné ukládat, otevřít dříve vytvořené, nebo otevřít nové (reset), pomocí tzv. *catalog files (*.clg)*.

6. Start měření:

Jakmile jsou všechny signály vybrány a nastaveny a přepneme se do online režimu, pak je možné spustit měření, pomocí ikony . Po ukončení měření se měřené signály zobrazí v grafu, tj. v záložce *Time diagram*, viz obr. 3.8.



Obr. 3.8 Změřený průběh - *Time diagram*

- A. Výběr aktivního měřeného signálu provedeme kliknutím na jeden z nich, pak se pro tento signál stává svislá osa aktivní a měřítko této osy odpovídá vybranému signálu. Pokud je v grafu zobrazeno více průběhů, nemají totožně umístěn počátek a měřítko svislé osy, vzájemné proporce signálů tedy mohou opticky zkreslovat.

- B. V dolní části obrazovky pod grafem je možné pomocí zatržení v kolonce *Display* příslušný signál v grafu zobrazit nebo nezobrazovat.
- C. Položka *Color* umožňuje změnit barvu měřeného signálu.
- D. Položka *Scale* má stejnou funkci jako A.
- E. Je také možné na obou osách pomocí „posuvek“ vybrat jen část zobrazovaného úseku, a přiblížit si (roztáhnout) část vybraného úseku.

7. Záložky:

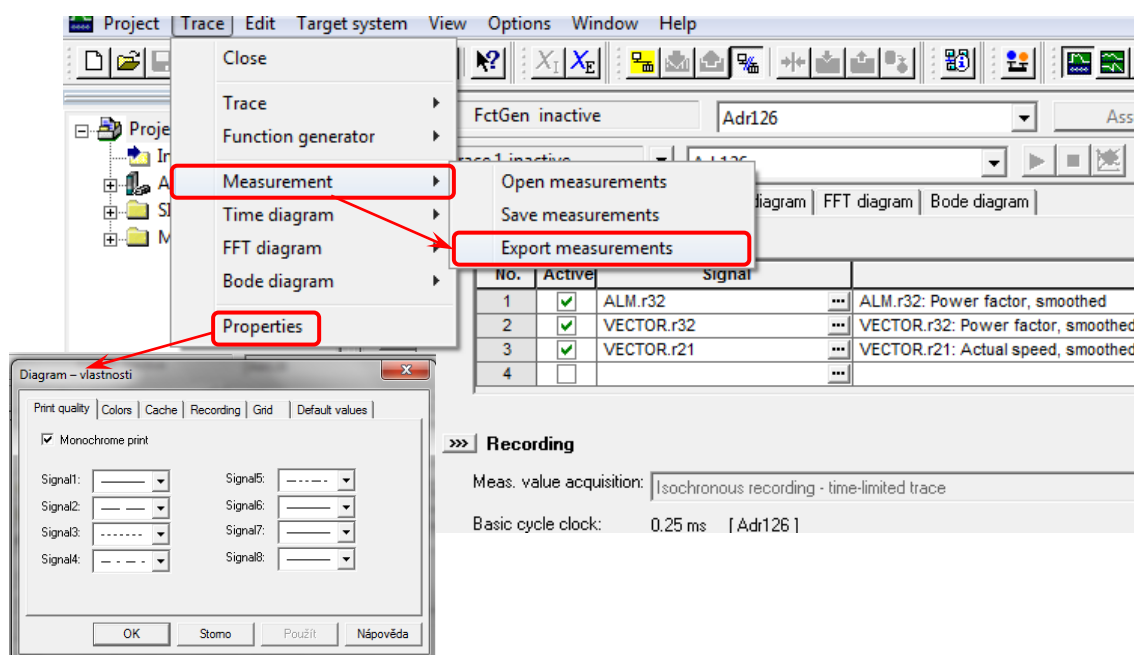
Mezi záložkami *Trace* / *Function generator* / *Measurements* / *Time diagram* / *FFT diagram* / *Bode diagram* je možné přepínat se a volit mezi nastavovacími funkcemi (*Trace*), zobrazovacími (*Time*, *FFT*, *Bode diagram*) a matematickými funkcemi (*Measurements*), nebo použít funkční generátor (*Function generator*).

Záložka ***Function generator*** – funkční generátor umožňuje generovat různé tvary signálů (obdélník, trojúhelník...) a slouží zejména k optimalizování regulace. Funkce je dostupná pouze v on-line režimu programu. Pro účely této diplomové práce nebyla využívána.

Záložky ***Time diagram*** / ***FFT diagram*** / ***Bode diagram*** slouží ke grafickému vyjádření naměřených hodnot, záložka *Time diagram* je popsána viz obr. 3.8, a další jsou popsány v kapitole 3.3.3 Matematické operace, protože s nimi úzce souvisejí.

Záložka ***Measurements*** – měření je určená k různým operacím s provedenými měřeními. Je možné otevřít měření (*Open measurements*), uložit měření ve formátu *.trc (*Save measurements*) a zejména provést export měření (*Export measurements*).

Příklad, jak provést export měření je na obr. 3.9.



Obr. 3.9 Export měření - *Export measurements* a vlastnosti - *Properties*

Export měření je možný v těchto formátech:

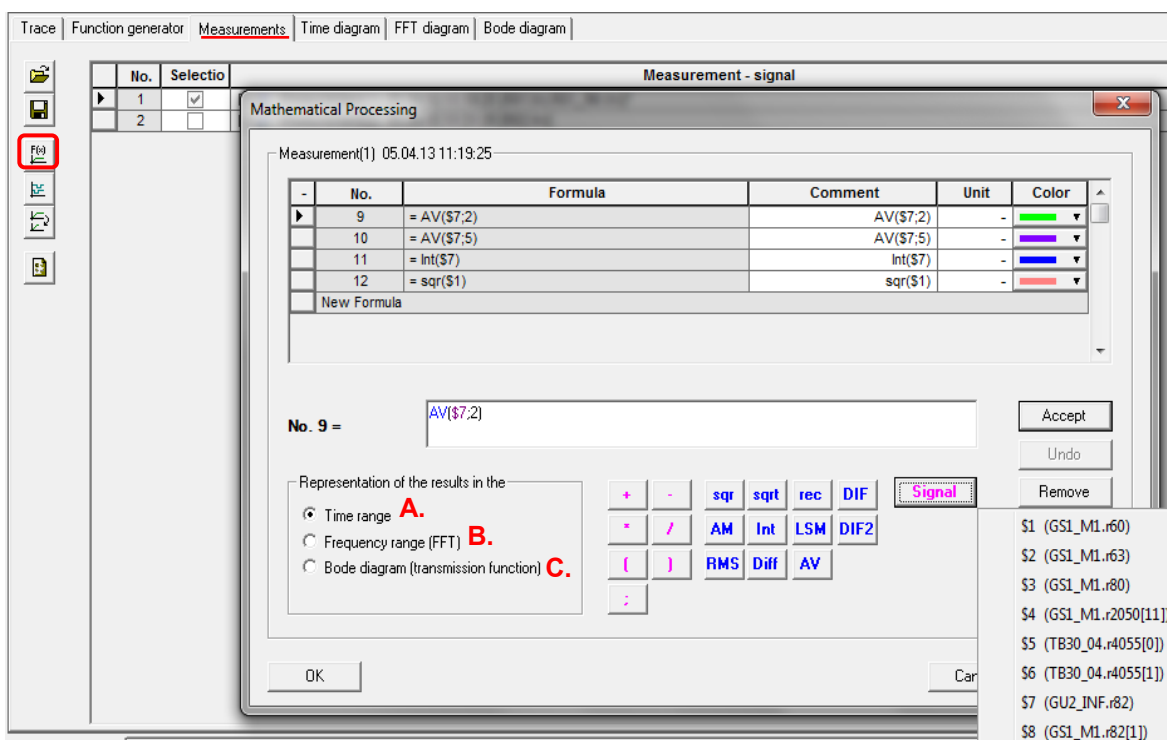
- *.csv
- *.txt
- *.emf
- *.xls

V menu *Trace* je také položka *Properties* – vlastnosti, kde je možné nastavit si, jakým způsobem se mají zobrazovat měřené průběhy, lze změnit barvu pozadí v časovém diagramu, zvolit nastavení mřížky, atd., viz předchozí obr. 3.9.

3.3.3. Matematické operace

Pokud je aktivní záložka **Measurements**, umožňuje s vybranými změřenými signály provádět matematické operace, které jsou rozděleny do tří skupin, z nichž první (A.) je nejrozsáhlejší.

Okno pro matematické operace je aktivováno stiskem ikonky , viz obr. 3.10.



Obr. 3.10 Matematické operace se signály

A. Signály vykreslované v časové oblasti – *Time range*

Po stisku tlačítka *Signal* jsou nabídnuty signály, se kterými je možné provádět matematické operace (např. \$1 znamená signál č.1). Vybraný výpočet se tedy definuje stiskem patřičného funkčního tlačítka, dále pak výběrem signálu, u některých typů operací je nutné signál uzavřít závorkami, u operací nabízející filtraci signálu se volí také řád filtru (1 až 5), kde 1 odpovídá nejnižšímu řádu filtru, 5 nejvyššímu. Tento řád filtru se uvádí za středníkem.

Je také možné provádět kombinaci několika funkcí, např. integrál součtu dvou signálů, př. syntaxe: Int(\$1+\$2).

Po potvrzení tlačítkem *Accept* je funkce připravena k použití. Po následném stisku tlačítka *OK* a přepnutí do grafu (*Time diagram*) je vykreslena zadaná operace.

Přehled jednotlivých matematických operací pro časovou oblast, s příklady korektní syntaxe výrazu pro výpočet, je uveden v tabulce č. 1.

Tlačítko	Název funkce		Příklad syntaxe výrazu
+	<i>Addition</i>	Sčítání	\$1+10 \$2+ \$3
-	<i>Subtraction</i>	Odečítání	\$1- \$2 \$1- 6
*	<i>Multiplication</i>	Násobení	\$3*5
/	<i>Division</i>	Dělení	\$3/2
sqr	<i>Square (x^2)</i>	Druhá mocnina	sqr(\$1)
sqrt	<i>Square root</i>	Odmocnina	sqrt(\$2)
rec	<i>Reciprocal value (1/x)</i>	Převrácená hodnota	rec(\$1)
AM	<i>Arithmetic mean</i>	Aritmetický průměr	AM(\$5)
Int	<i>Numerical integration</i>	Číselná integrace	Int(\$5+\$6)
LMS	<i>Least squares method</i>	Metoda nejmenších čtverců	LSM(\$1)
RMS	<i>Root mean square</i>	Efektivní hodnota	RMS(\$8)
DIF	<i>Simple differentiation with average value filter of the 1st to 5th order</i>	První derivace střední hodnoty filtrem 1. až 5. řádu	DIF(\$1;1) DIF(\$1;5)
DIF2	<i>Double differentiation with average value filter of the 1st to 5th order</i>	Druhá derivace střední hodnoty filtrem 1. až 5. řádu	DIF2(\$1;1) DIF2(\$1;5)
Diff	<i>Numerical differentiation</i>	Číselná derivace	Diff(\$8)
AV	<i>Average value filter of the 1st to 5th order</i>	Filtr střední hodnoty 1. až 5. řádu	AV(\$7;3)

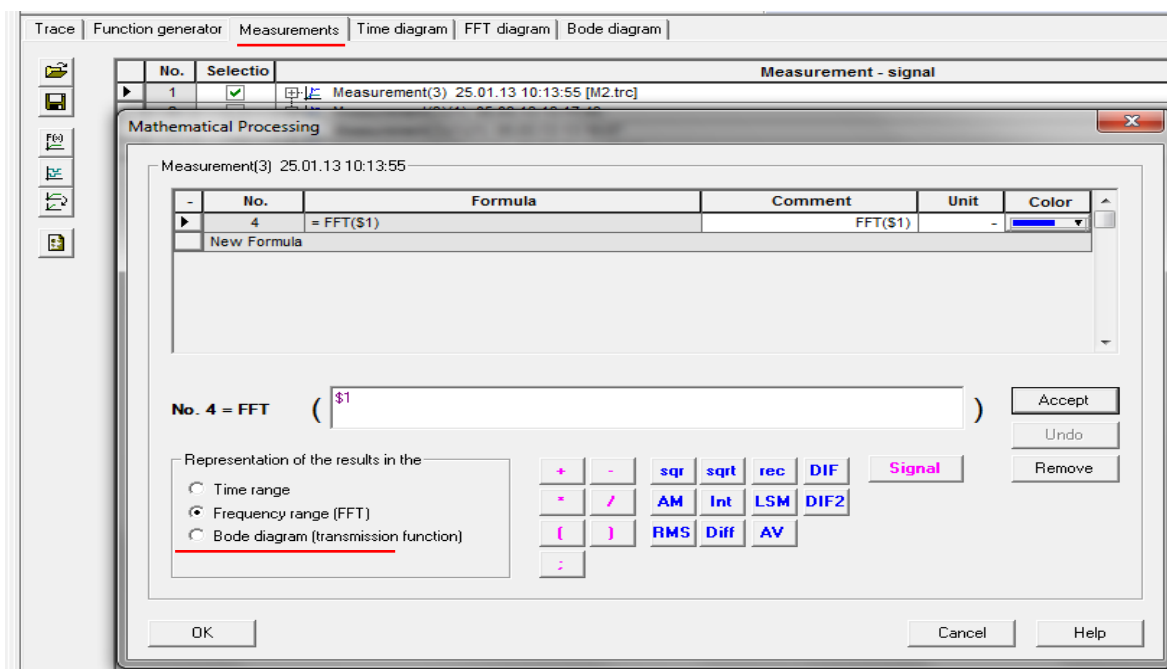
Tab. 1 Matematické operace v časové oblasti

Pozn.: Pokud není výraz korektně definován, není tlačítko *Accept* aktivní.

B. Frekvenční analýza signálu - *Frequency range (FFT)*

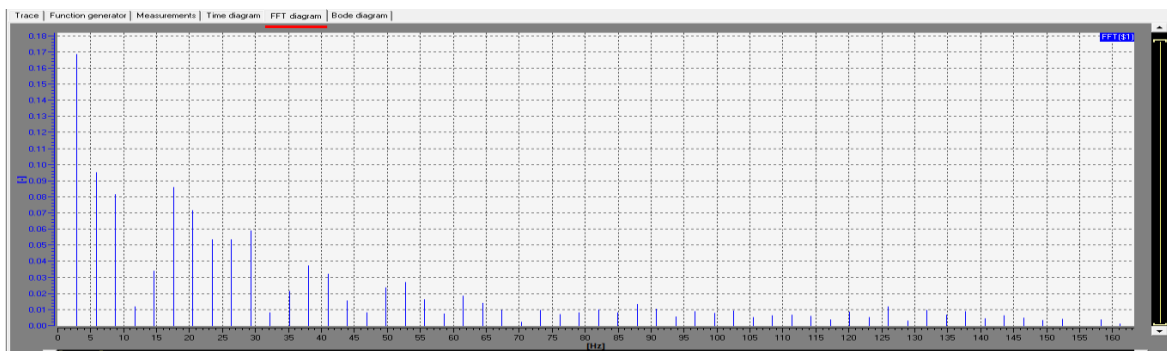
Pro výpočet rychlé Fourierovy transformace, která převádí měřený signál z časové oblasti do frekvenční, slouží matematická funkce FFT, ta je aktivní po kliknutí na tlačítko *Frequency range*. Stačí zadat příslušný signál, pro který je FFT požadována a po stisku tlačítek, *Accept* a *OK* je výsledek vypočítán a graf zobrazen po přepnutí ze záložky *Measurements* na záložku **FFT diagram**.

Na obrázku 3.11 je patrný způsob zadávání příkazu pro výpočet FFT.



Obr. 3.11 Zadání příkazu pro FFT

Vzorový příklad zobrazení grafu po provedení výpočtu FFT je na následujícím obrázku 3.12.

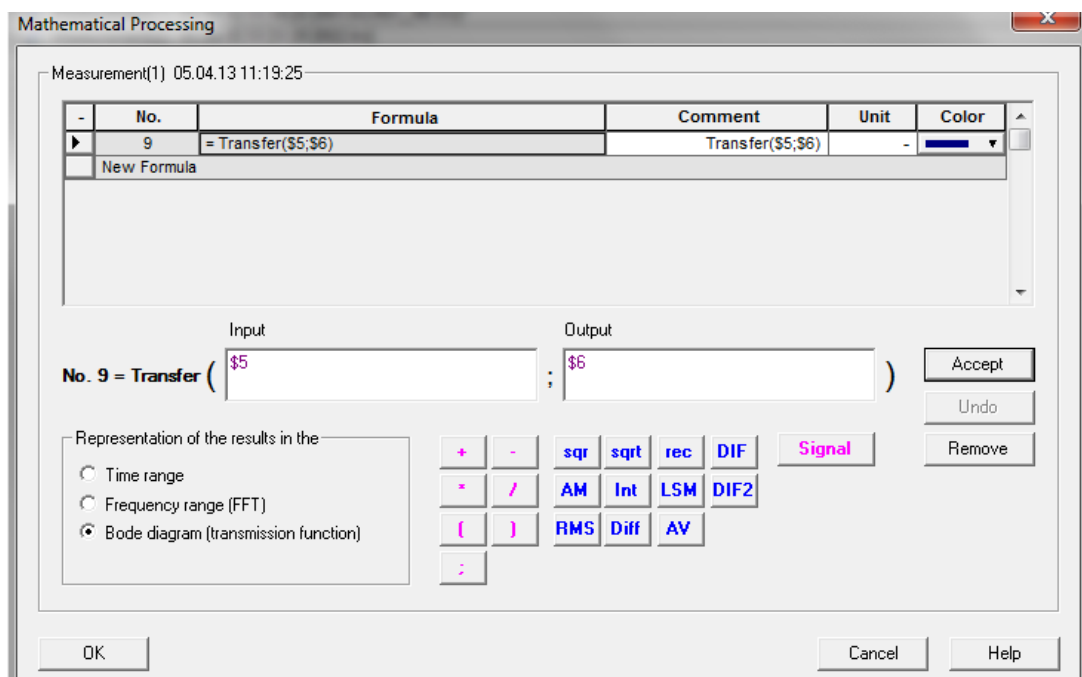


Obr. 3.12 Vzorový FFT diagram

C. Bodeho diagram - Bode diagram (transmission function)

Pro zobrazení amplitudové a frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích je určena operace *Bode diagram (transmission function)*, která porovnává výstupní signál (*Output*) ke vstupnímu (*Input*) a vypovídá zejména o stabilitě regulovaného systému. Výsledek operace je zobrazen po přepnutí na záložku **Bode diagram**.

Příklad zadání syntaxe pro výpočet je znázorněn na obrázku 3.13.



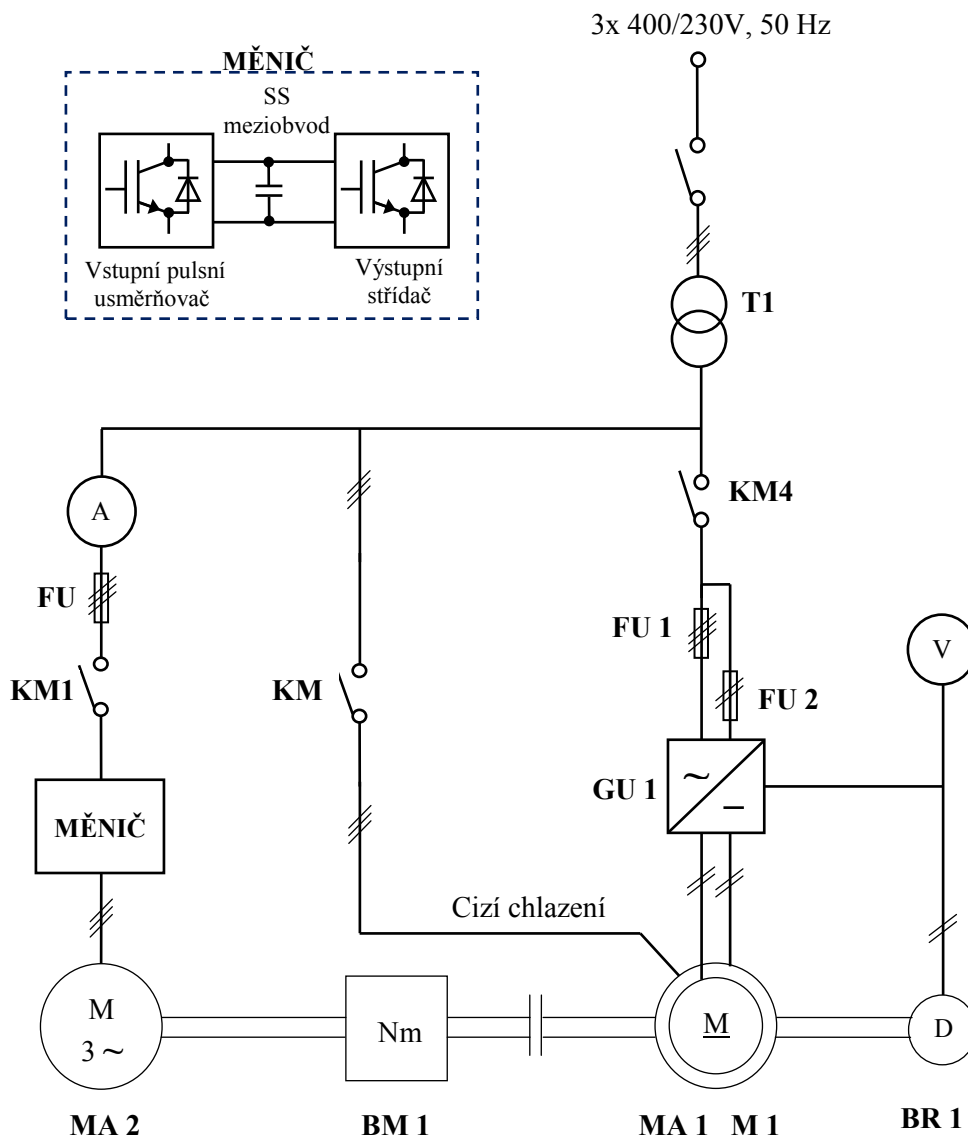
Obr. 3.13 Zadání příkazu pro výpočet Bodeho diagramu

4. Měření v laboratoři a analýza dat

Ověřování parametrů měniče probíhalo v laboratoři E103, spadající pod katedru Elektroniky na FEI VŠB-TU Ostrava. Na tomto pracovišti byla prostřednictvím ovládacího programu shromažďována měřená data, a to s využitím funkce *Trace*, taktéž byly některé signály upraveny pomocí matematických operací, následně byla data exportována ve formátu *.csv a dále zpracována v programu Microsoft Excel (2010).

V následujících podkapitolách je vyobrazeno schéma zapojení měřeného pracoviště, popis jeho jednotlivých prvků a také výstupy měření, tj. jednotlivé grafy a komentáře k těmto měřením.

4.1. Schéma zapojení měřeného pracoviště



Obr. 4.1 Schéma zapojení měřeného pracoviště

4.2. Popis a parametry jednotlivých částí měřeného pracoviště

Specifikace jednotlivých částí pohonu, umístěného v laboratoři E103 je v tabulce č. 2.

Napájecí síť - 3x 400/230V, 50 Hz			
Vstupní obvody			
Pojistky	FU; FU 1 – typ P 40 N06, 32 A; FU 2 - 5A		
Stykače	KM 1; KM 2; KM 4		
Vstupní transformátor T1	typ TOC-20-030 YZ1, P-S 3x 380/230V, 50 Hz, 20 kVA, 30A, $u_k = 4,5 \%$, $\cos\varphi_k = 0,82$		
Měnič			
Řídící Jednotka Cu320 Siemens	Typ: 6SL3040-0MA00-0AA1 Napájení: 24 V DC		
Karta Compactflash	Typ: 6SL3055-0AA00-2TA0 Model: TB 30		
Napájecí Modul	Typ: 6RP1 333-3BA00 Vstup: 120/230 – 500 V, 50-60 H Výstup: DC 24 V, 5 A		
Usměrňovací Modul	Typ: 6SL3130-7TE21-6AA1 Vstup: 3 AC 380/480, 50-60 Hz Výstup: DC 600 V, 16 kW, 27 A		
Motorový Modul	Typ: 6SL3130-1TE21-0AA1 Vstup: DC 600 V Výstup: 3 AC 400 V, 9A Výkon: 16 kW		
Řízený usměrňovač GUI			
Typ: SIMOREG-K D420/30 GeG6V62-4A0 No:6RA2418-6DV62-0 Vstup:400 V, 25 A, 50/60 Hz Výstup:330 V, 5 A			
3 – fázový asynchronní motor MA2			
Výrobce:	MEZ Mohelnice	No:	2495356
Typ:	4AP 132M-4	Krytí:	IP54
Tvar:	IM1082	Výkon:	7,5 kW pro S1
Napájení:	Y/D 380/220 V 15,2/26,3 A	Cos φ :	0,86
Hmotnost:	86 kg	Číslo:	33187-6049-9306
Jm.hodnota otáček:	1450 ot/min	Kmitočet U_{VST}	50Hz
Stejnoseměrný tachogenerátor MA1			
Výrobce:	MEZ Mohelnice	No:	3667690
Typ:	TTN 20Ab 35320019	Výkon:	15 kW pro S1
Napájení:	440 V 37,5 A	Buzení:	C 190 V / 1 A
Rozsah otáček:	28-2800 ot/min	Jmenovitý proud:	17,5 A
Vstup:	3-f 380-460 V		
Tenzometrická měrná tyč BM1 (± 100 Nm)			
Tachodynamo BR1 – Typ K 10 A2, 80V/1000 ot/min			

Tab. 2 Popis a parametry jednotlivých částí měřeného pracoviště

4.3. Vzorce použité v analýze změřených dat

Výkon motoru: $P_{AM} = M \cdot \omega$ (W) (4.1)

Moment motoru: $M = c\varphi \cdot I_a$ (N·m) (4.2)

Konstanta motoru: $c\varphi = \frac{U_{an} - R_a I_{an}}{\omega_n}$ (V·s) (4.3)

Úhlová rychlost motoru: $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ (rad·s⁻¹) (4.4)

4.4. Parametry měniče použité pro měření pomocí funkce *Trace*

Parametry měniče použité pro měření v laboratoři E103, s využitím funkce *Trace*, jsou v následující tabulce č. 3:

Modul	Název parametru			Jednotka
ALM	r.25	<i>In feed input voltage, smoothed</i>	Vstupní napětí, filtrované	V
	r.26	<i>DC link voltage, smoothed</i>	Napětí SS meziobvodu, filtrované	V
	r.27	<i>Absolute actual current, smoothed</i>	Aktuální absolutní hodnota proudu, filtrovaná	A
	r.32	<i>Power factor, smoothed</i>	Činný výkon	kW
	r.82	<i>Active power actual value</i>	Skutečná hodnota výkonu	kW
VECTOR	r.21	<i>Actual speed, smoothed</i>	Skutečné otáčky motoru	ot·min ⁻¹
	r.29	<i>Drive, smoothed field generating current actual value</i>	Magnetizační proud	A
	r.30	<i>Current actual value, torque - generating, smoothed</i>	Momentotvorný proud	A
	r.31	<i>Actual torque, smoothed</i>	Skutečný točivý moment	N·m
	r.32	<i>Power factor, smoothed</i>	Činný výkon	kW

Tab. 3 Parametry měniče využité při měření v laboratoři

4.5. Měření a analýza dat

Měření probíhalo pro různé parametry, viz tabulka 3, motor byl nezatížený, tedy ve stavu naprázdno.

4.5.1. Měření příkonu řídicí jednotky (CU) na prázdkno

Použité parametry při měření pomocí funkce *Trace*:

ALM r.82 - Active power actual value (P_{CU_aktual})

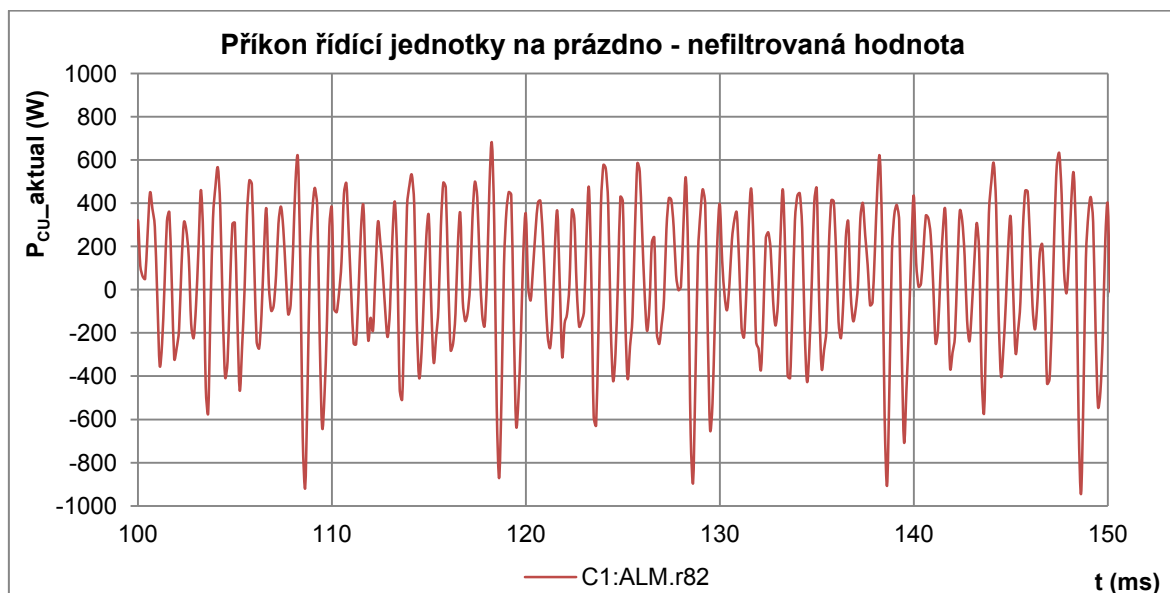
ALM r.32 - Power factor, smoothed (P_{CU_vyhl})

Vzorkovací frekvence: $f_{vz} = 8 \text{ kHz}$

Příkon CU byl měřen v časovém rozsahu 511 ms, pomocí dvou parametrů.

Hodnota P_{cu_aktual} představuje měření nefiltrovaného signálu ze vstupního usměrňovacího modulu ALM, který značně kolísá. Na obr. 4.2 je zobrazen časový úsek 100 až 150 ms, jedná se tedy o výřez signálu.

V programu Excel je vypočítána střední hodnota tohoto signálu, která je spotřebou řídicí jednotky naprázdno.

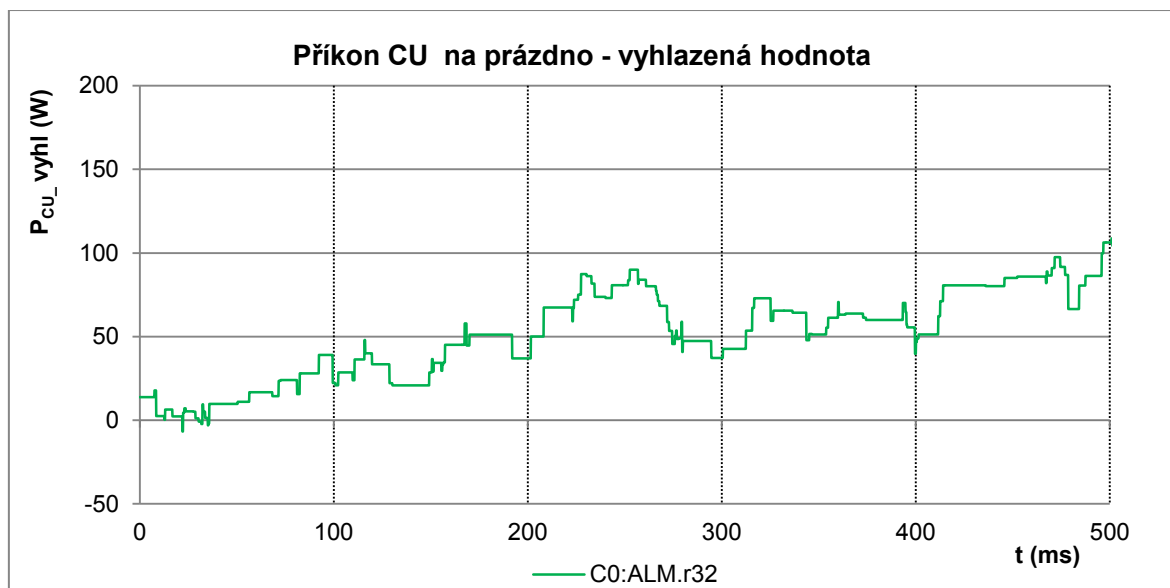


Obr. 4.2 Měření příkonu řídicí jednotky naprázdno – nefiltrovaná hodnota

Výpočet v Excelu:

Střední hodnota příkonu $P_{cu_aktual} = 46 \text{ W}$

Druhý parametr P_{cu_vyhl} , představuje hodnotu vyhlazenou, obslužný program má při tomto typu měření zvoleného parametru nastavený určitý typ filtrace.



Obr. 4.3 Měření příkonu řídicí jednotky naprázdno – filtrovaná hodnota

4.5.2. Měření vstupního napětí a proudu, napětí meziobvodu

Použité parametry při měření pomocí funkce *Trace*:

ALM r.25 – In feed input voltage, smoothed (U_{vst})

ALM r.26 - DC link voltage, smoothed (U_d)

ALM r.27 - Absolute actual current, smoothed (I_{vst})

Vzorkovací frekvence: $f_{vz} = 8 \text{ kHz}$

Hodnoty vstupního napětí, napětí meziobvodu a vstupního proudu byly měřeny v časovém rozsahu 340 ms. Použitá vzorkovací frekvence byla 8 kHz.

Detaily jednotlivých měřených průběhů jsou zobrazeny v grafech 4.4 a,b,c, kde je patrný poměrně malý rozptyl těchto hodnot. Střední hodnoty byly opět vypočítány v Excelu.

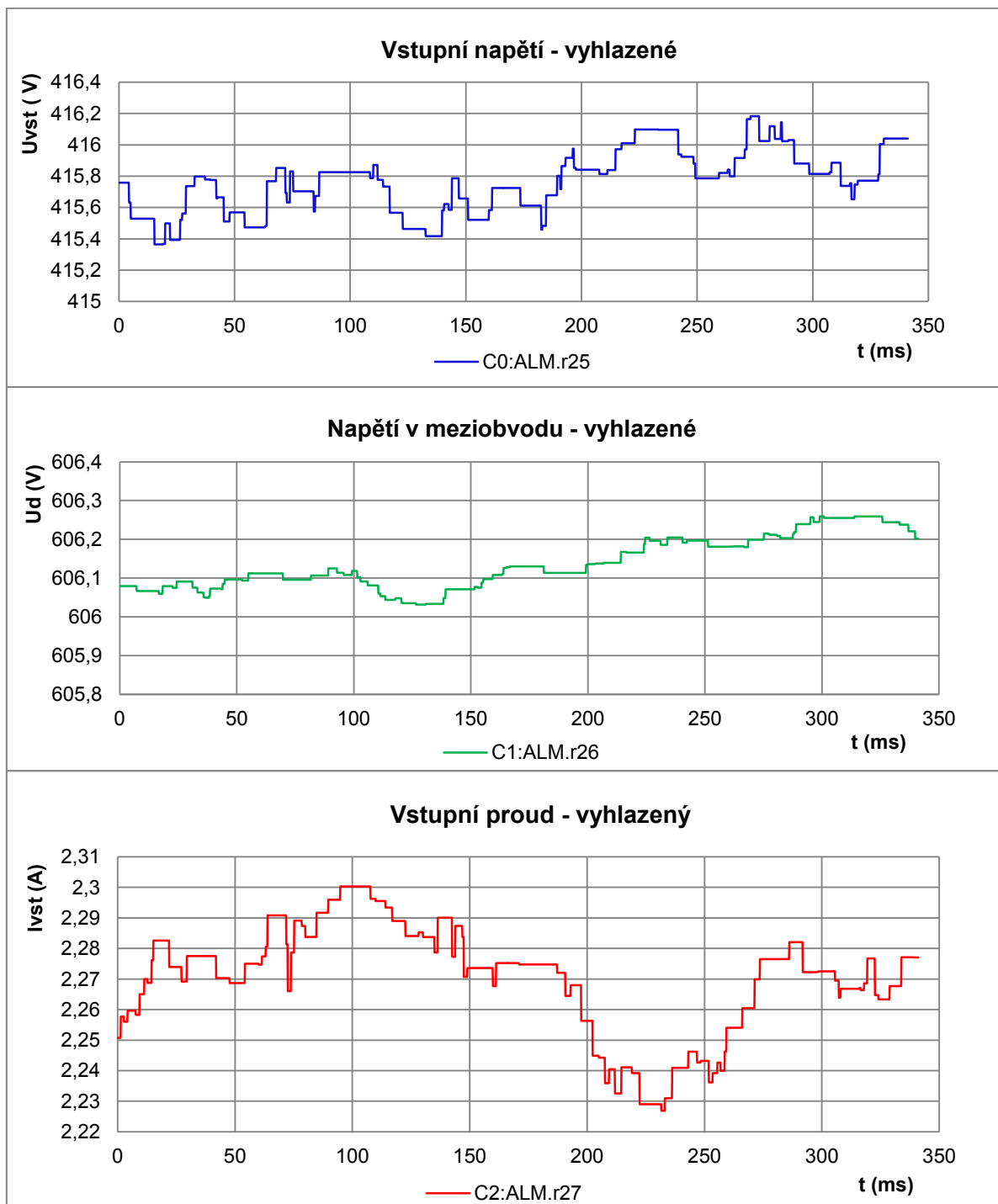
Výpočet v Excelu:

Střední hodnota $U_{vst} = 415,76 \text{ V}$

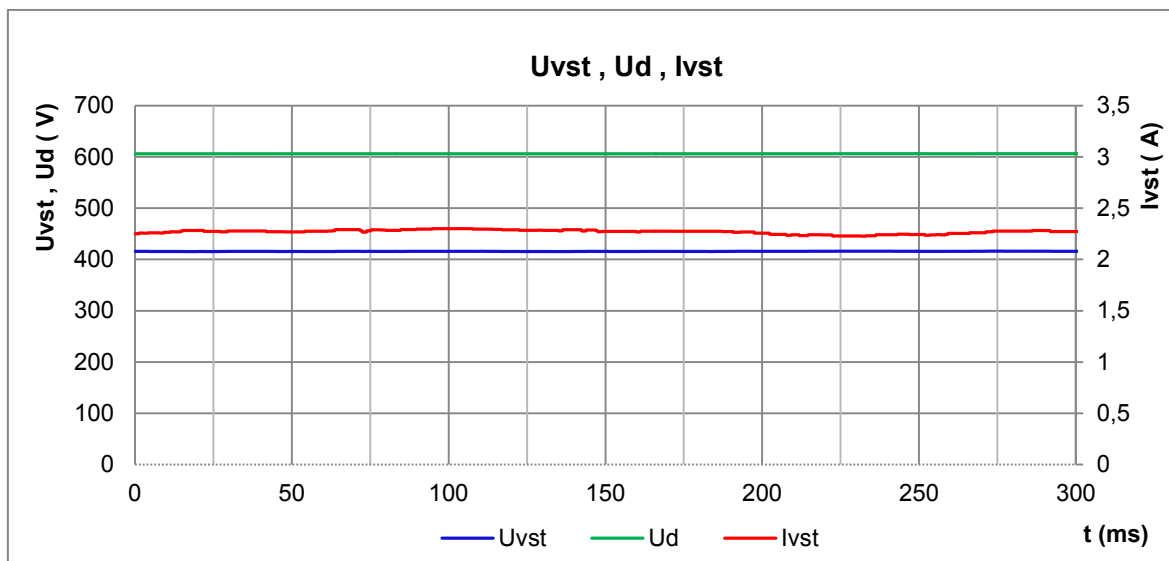
Střední hodnota $U_d = 606,13 \text{ V}$

Střední hodnota $I_{vst} = 2,27 \text{ A}$

Graf 4.5 představuje totéž měření, ale všechny parametry jsou vyneseny do společného grafu. Napěťová osa je společná pro U_{vst} a U_{d} , proud I_{vst} má osu vlastní. V tomto měřítku zobrazení jsou hodnoty napětí dokonale přímkové, proud je mírně zvlňněný.



Obr. 4.4a, b, c Měření vstupního napětí, napětí meziobvodu, vstupního proudu – filtrované hodnoty, detail jednotlivých signálů



Obr. 4.5 Měření vstupního napětí, napětí meziobvodu, vstupního proudu – filtrované hodnoty

4.5.3. Měření magnetizačního a momentotvorného proudu

Při vektorovém řízení motoru jsou charakteristickými veličinami momentotvorný a magnetizační proud.

Oba parametry byly měřeny v čase 2047 ms, s vzorkovací frekvencí 2 kHz.

Použité parametry při měření pomocí funkce *Trace*:

VECTOR r.29 – Drive, smoothed field generating current actual value (i_q)

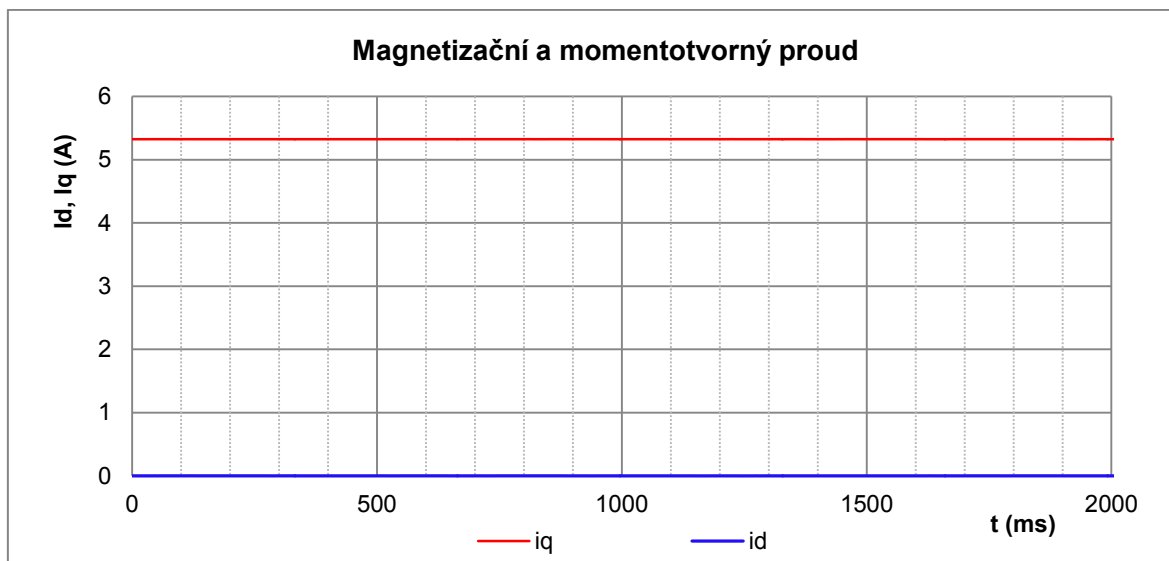
VECTOR r.30 - Current actual value, torque - generating, smoothed (i_d)

Zobrazení obou proudů v jednom grafu, představuje obr. 4.6, kde momentotvorný proud je nulový, to odpovídá stavu motoru naprázdno.

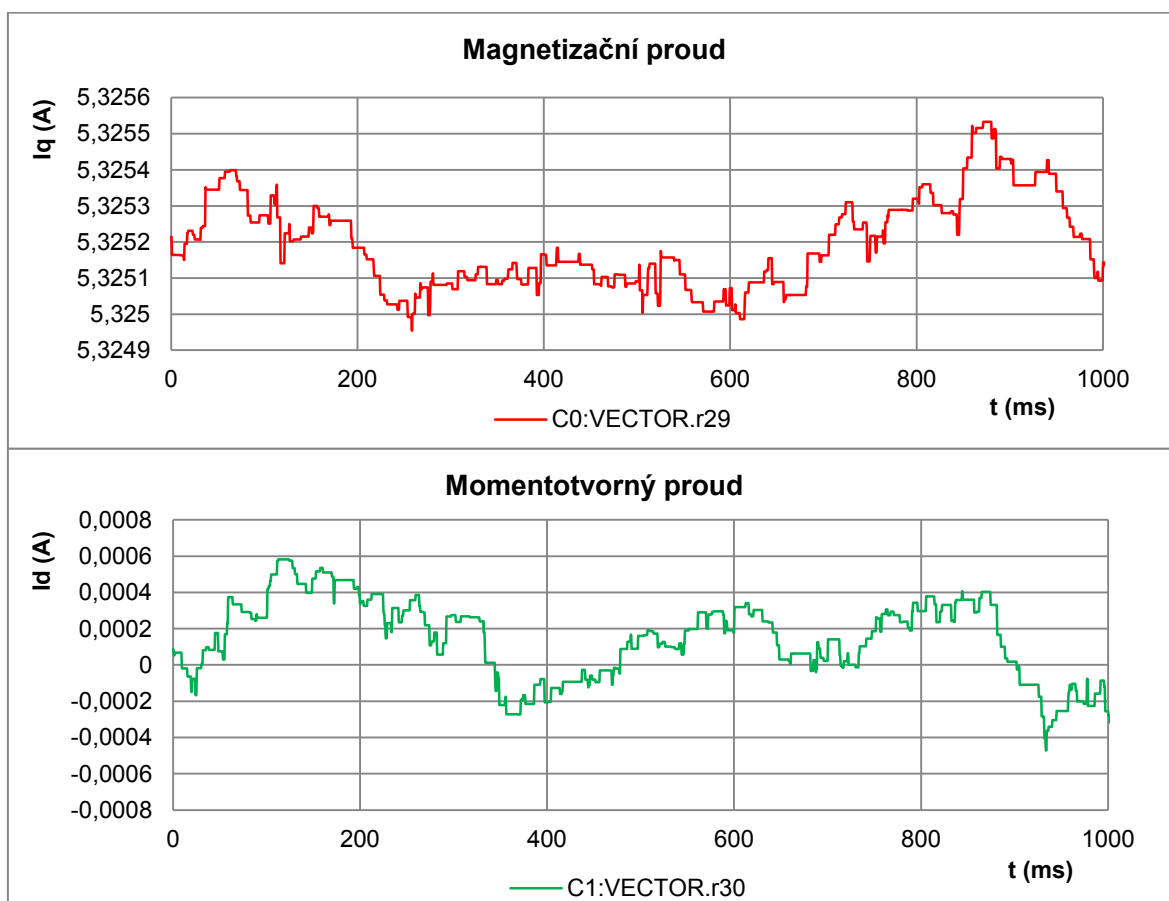
Výpočet v Excelu:

Střední hodnota magnetizačního proudu $I_q = 5,325$ A

Detailní průběhy obou proudů v čase 0 až 1000 ms jsou zobrazeny na obr. 4.7a,b.



Obr. 4.6 Měření magnetizačního a momentotvorného proudu



Obr. 4.7a,b Detailní zobrazení měření magnetizačního a momentotvorného proudu

4.5.4. Měření parametrů při rozběhu a brzdění motoru naprázdno

Nejrozsáhlejším měřením bylo měření rozběhu a brzdění motoru naprázdno. Pro toto měření byly použity parametry pro měření příkonu řídicí jednotky, skutečných otáček motoru, momentu motoru a výkonu AM. Čas měření byl 5007,5 ms + pretrigger 110 ms. Vzorkovací frekvence: $f_{vz} = 400$ Hz.

Použité parametry při měření pomocí funkce *Trace*:

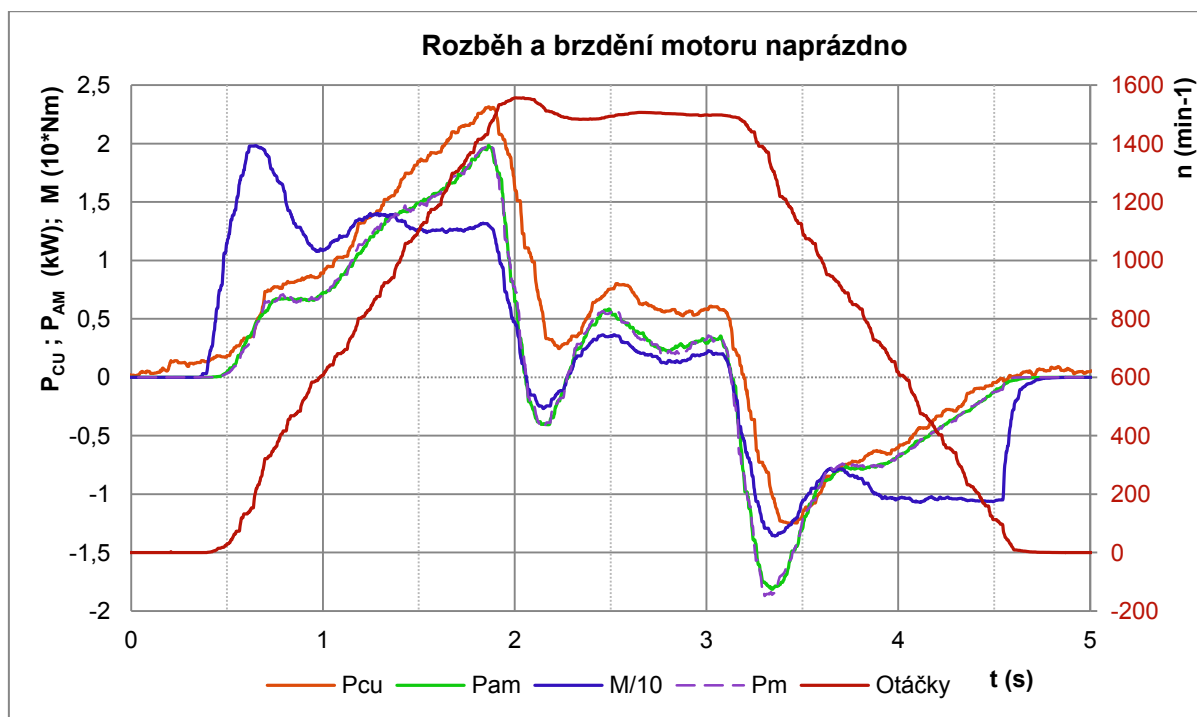
ALM r.32 Power factor, smoothed (P_{cu})

VECTOR r.21 Actual speed, smoothed (n)

VECTOR r.31 Actual torque, smoothed (M)

VECTOR r.32 Power factor, smoothed (P_{am})

Pro měření AM s vektorovým řízením je možné využít max. počtu 4 parametrů, tak tomu bylo i v případě tohoto měření. V grafu na obr. 4.8 jsou na společné svislé hlavní ose vyneseny parametry pro příkon řídicí jednotky P_{cu} , výkon motoru P_{am} , aby bylo možné zobrazit v témže grafu i moment motoru M , jsou jeho naměřené hodnoty upraveny v poměru 1:10 (1 díl v grafu odpovídá 10 Nm ve skutečnosti), parametr P_m představuje vypočítaný výkon motoru z naměřených hodnot otáček motoru a momentu motoru. Tato vypočítaná hodnota je takřka identická se změřenou hodnotou. Při výpočtu byly použity vzorce, viz kapitola 4.3. Na vedlejší svislé ose jsou vyneseny skutečné otáčky motoru n .

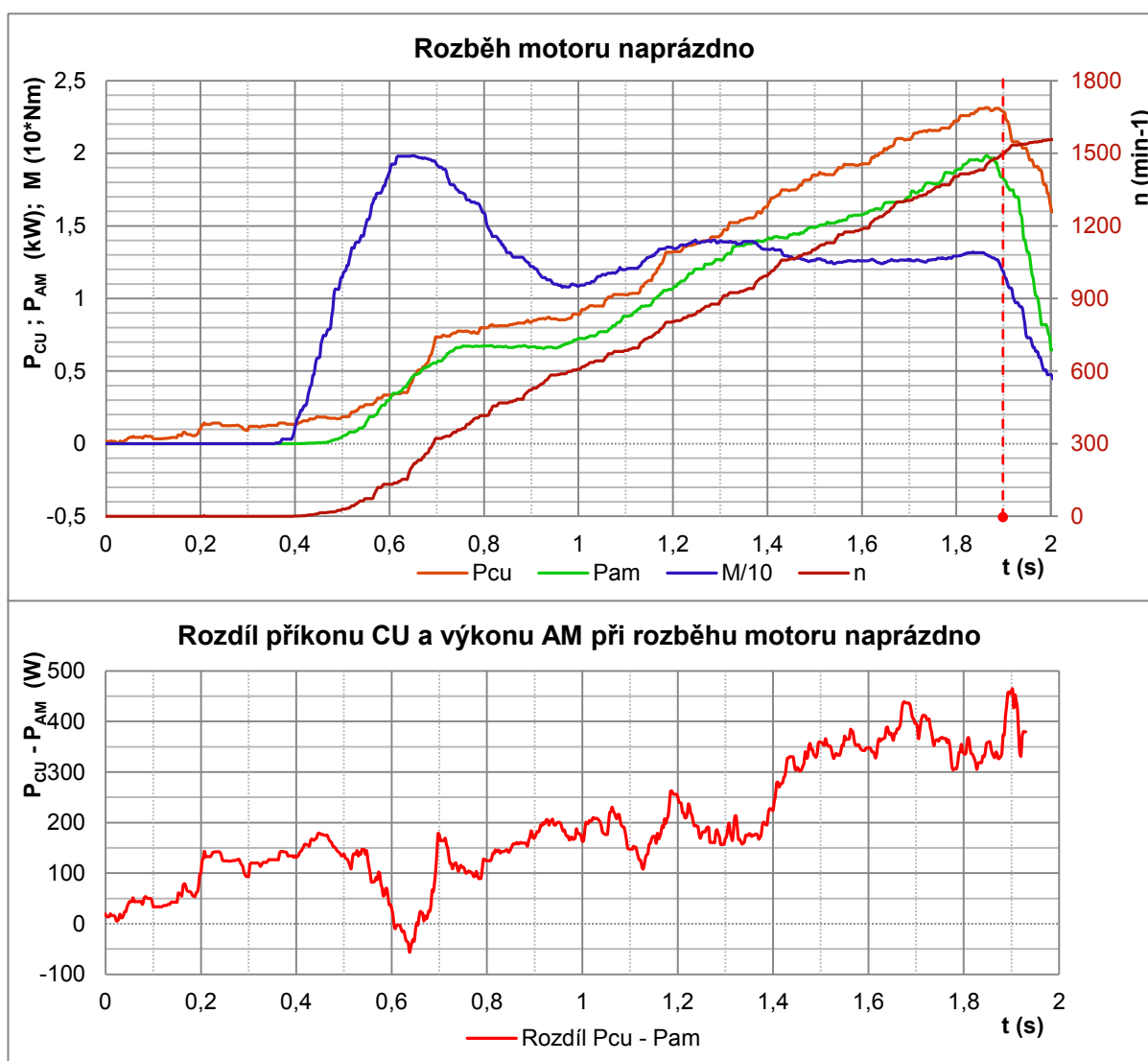


Obr. 4.8 Měření parametrů při rozběhu a brzdění motoru naprázdno

Toto měření můžeme rozdělit do tří fází chodu motoru, které budou následně podrobněji popsány.

Rozběh motoru

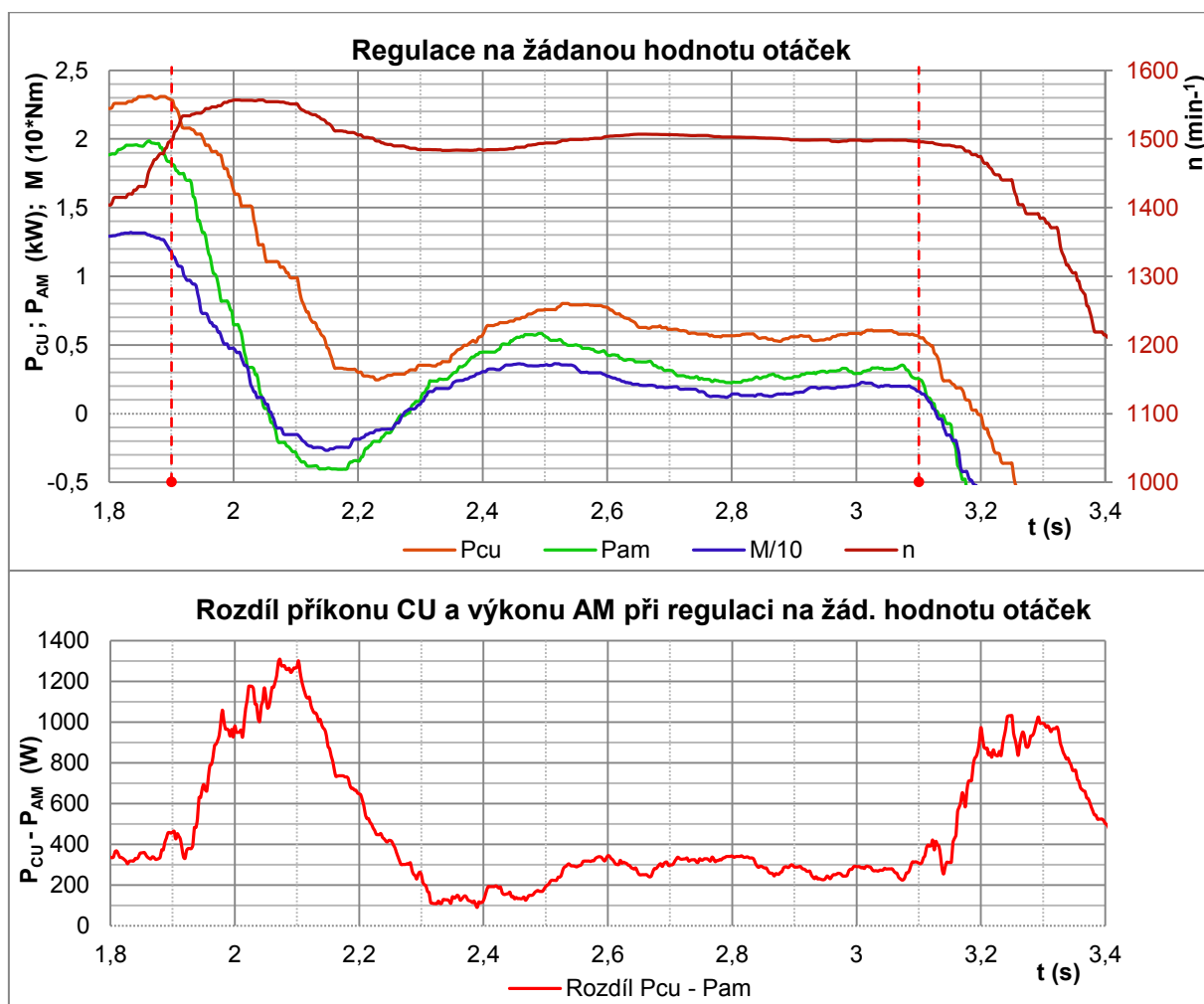
Při rozběhu motoru naprázdno můžeme pozorovat pozvolný nárůst otáček motoru, z nulové hodnoty do hodnoty 1500 otáček/min, kdy motor dosáhne maximálních nastavených otáček. Rozběh motoru trvá přibližně 1900 ms. Od okamžiku cca 370 ms dochází k prudkému růstu momentu motoru, tento růst trvá přibližně 280 ms, kdy moment dosáhne své maximální hodnoty 19,83 Nm. Tento moment bývá označován jako záběrný moment. Příkon řídicí jednotky je nenulový i v době před vlastním rozběhem motoru, řídicí jednotka pro svoji činnost spotřebovává určité množství elektrické energie (viz měření 4.5.1). Příkon CU i výkon AM roste pozvolna, kopíruje při tom tvar křivky růstu otáček, kromě okamžiku, kdy motor dosahuje maximálního momentu. Zde dochází k regulačnímu překmitu. Rozdíl hodnot mezi příkonem CU a výkonem AM ukazuje graf 4.9b., je na něm patrný tento regulační překmit, v tuto chvíli klesá do záporných hodnot.



Obr. 4.9a,b Rozběh motoru naprázdno

Regulace na žádanou hodnotu otáček

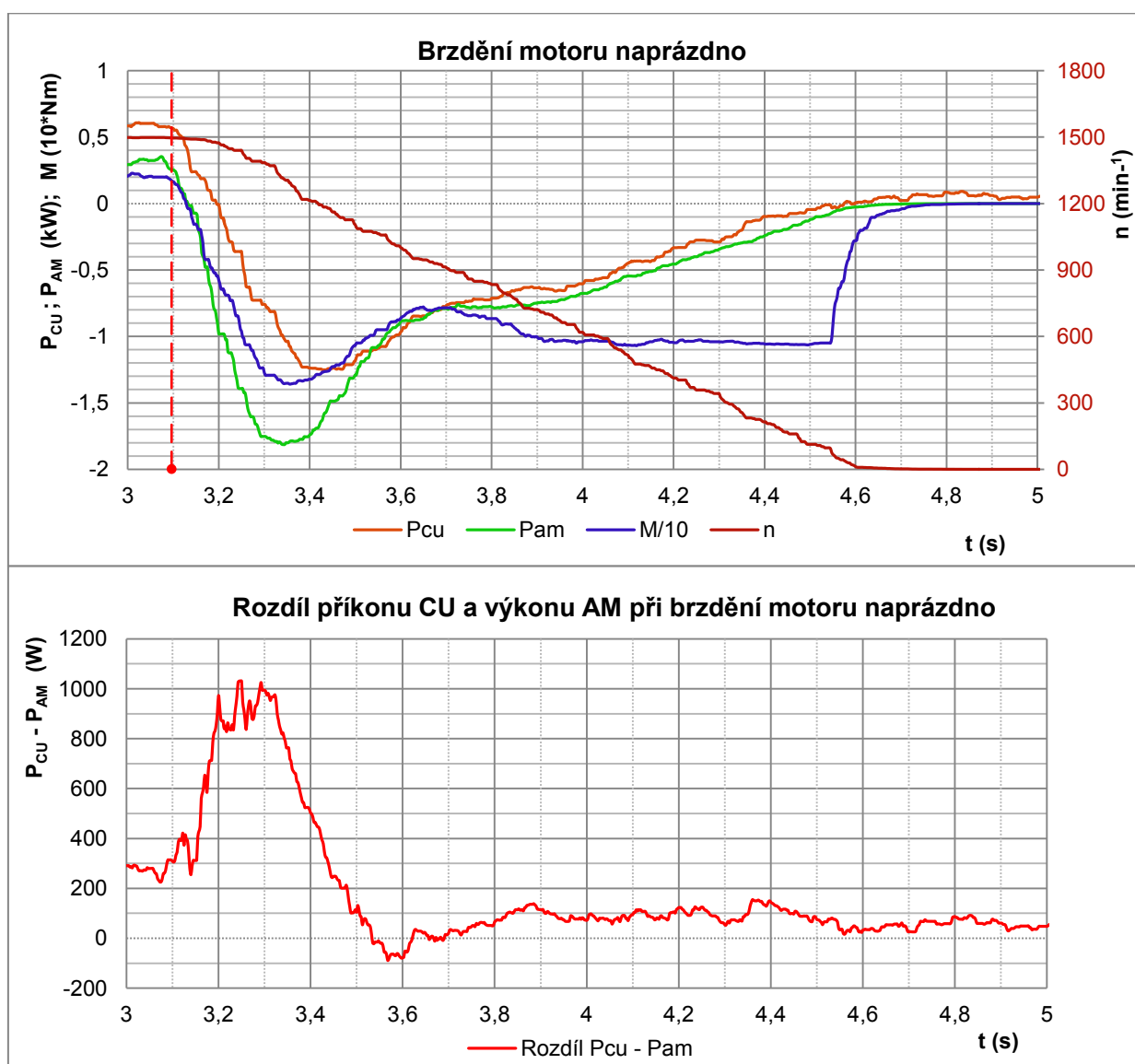
Jakmile dosáhne motor hodnoty 1500 otáček/min, je ukončen rozběh motoru a probíhá regulace rychlosti na žádanou hodnotu otáček. Na průběhu grafu 4.10a je patrná činnost regulátoru otáček, kdy dochází k regulačnímu překmitu a posléze k ustálení na žádané hodnotě. Tento tvar kmitů a doba regulace otáček jsou dány nastavením regulátoru. Čas, kdy motor pracuje za tohoto provozního stavu je v rozmezí cca 1900 ms až 3100 ms. Po ukončení rozběhu motoru moment motoru začíná klesat (z hodnoty cca 13 Nm), jeho pokles pokračuje až do záporných hodnot (cca -2,5 Nm). Následně tvar křivky momentu kmitá a odpovídá tak regulačnímu ději regulátoru otáček a před započítím brzdění motoru dosahuje hodnoty přibližně 2 Nm. Příkon CU a Výkon AM od ukončení rozběhu motoru klesá a jejich křivky se pohybují po trajektorii kopírující průběh momentu motoru. Příkon CU zůstává v kladných hodnotách, na začátku tohoto stavu dosahuje hodnoty 2,3 kW, nejnižší hodnota je 274 W a před začátkem brzdění je cca 600 W. Výkon motoru se snižuje z hodnoty 1,8 kW, až do záporných hodnot -400 W a na konci regulačního děje dosahuje přibližně 300 W. Rozdíl mezi P_{CU} a P_{AM} je patrný z grafu 4.10b. Největší rozdíl těchto hodnot je v čase, kdy je moment motoru záporný, tehdy přechází motor z motorického režimu do generátorického a energie vracející se z motoru do měniče je využita na pokrytí ztrát vznikajících při provozu měniče.



Obr. 4.10a,b Chod motoru naprázdno

Brzdění motoru

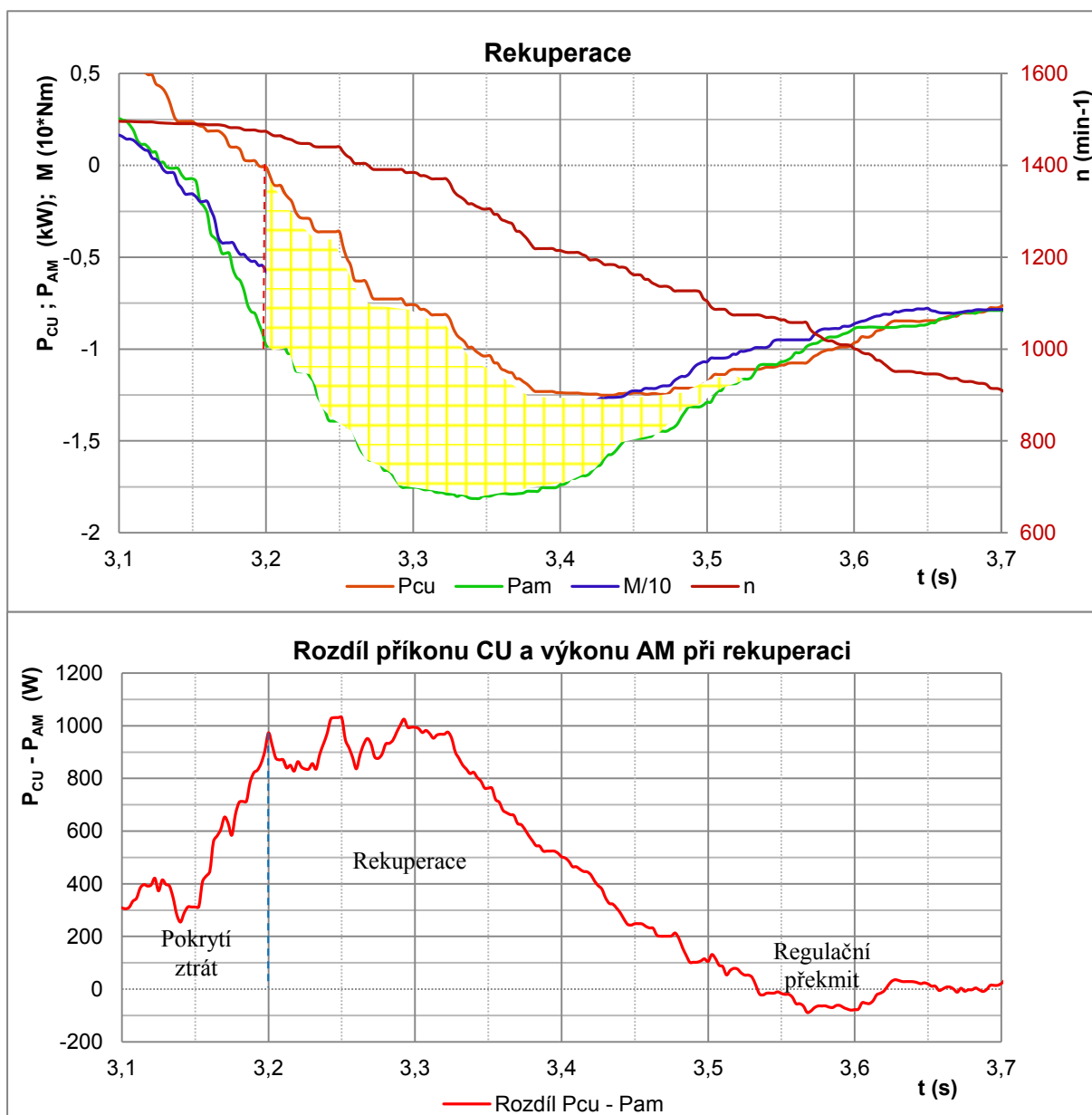
Graf brzdění motoru je na obr. 4.11a. Brzdění motoru začíná poklesem otáček pod žádanou hodnotu a trvá do doby, než dosáhnou nulové hodnoty. Zároveň prudce klesá moment motoru, přechází do záporných hodnot, motor mění svůj provozní stav a přechází do generátorického režimu. Dochází také ke změně toku výkonů, P_{CU} a P_{AM} klesají až do záporných hodnot. Protože motor elektrickou energii nespotebovává, ale v tomto stavu ji dodává do měniče a pokud příkon měniče je nižší jak el. energie dodávaná motorem, dochází k rekuperaci elektrické energie do sítě. Tento stav je umožněn použitím pulsního usměrňovače na vstupu měniče.



Obr. 4.11a,b Brzdění motoru naprázdno

Detail průběhů momentu, otáček, příkonu CU a výkonu AM při rekuperaci je na obr. 4.12a. Rozdíl příkonu CU a výkonu AM při rekuperaci je pak na obr. 4.12b.

Rekuperace elektrické energie do sítě začíná okamžikem změny toku proudu řídicí jednotkou. Před tímto okamžikem, v době, kdy už je moment motoru záporný, ale příkon CU stále kladný, je energie vracená ze strany motoru do měniče spotřebována v tomto měniči. Stejně, jako při rozběhu motoru, dochází zde ke krátkému regulačnímu překmitu, kdy rozdíl mezi P_{CU} a P_{AM} klesá do záporných hodnot. Rekuperace elektrické energie do sítě je umožněná použitím vstupního pulsního usměrňovače a její množství je na obr. 4.12a reprezentováno žlutou plochou.



Obr. 4.12a,b Rekuperace elektrické energie

5. Projekt ALFA

Projekt ALFA se zabývá využitím regulovaných rekuperačních převodníků (měničů) a je realizován pod záštitou Technologické agentury ČR, podílí se na něm i katedra Elektroniky při VŠB – TU Ostrava. Označení tohoto projektu je TA01010705.

Měření probíhalo na modelu pohonu, používaném v divadelní technice. Pohon je tvořen kombinací AM a hydromotoru, přes sérii kladek bylo spouštěno a navijeno lano, na jehož konci byla připevněna zátěž o měnící se hmotnosti v rozpětí 100 ÷ 400 kg.

Měření bylo realizováno ovládacím programem STARTER, s řízením typu SERVO, kdy bylo monitorováno 8 parametrů. Stejně jako v případě měření v laboratoři E106 byla využita k zaznamenávání průběhů funkce *Trace* ovládacího programu. Celkem bylo provedeno 44 měření, se zvedáním nebo spouštěním břemene, kde byla jako vstupní parametr použita žádaná hodnota zrychlení a (mm/s²) a celková dráha pojezdu s (mm).

Změřená data ve formátu *.trc mě posléze byla předána k analýze.

5.1. Parametry měniče použité při měření

Modul	Název parametru			Jednotka
GS1_M1	r.60	<i>Speed setpoint before the setpoint filter</i>	Žádaná hodnota otáček	min ⁻¹
	r.63	<i>Actual speed, smoothed</i>	Skutečné otáčky motoru	min ⁻¹
	r.80	<i>Torque actual value</i>	Skutečný točivý moment	Nm
	r.2050[11]	<i>IF1 PROFIdrive PZD receive word, PZD 12</i>	Poloha	mm
	r.82[1]	<i>Active power actual value, smoothed with p0045</i>	Výkon (filtrovaný)	kW
TB_30_04	r.4055[0]	<i>TB30 analog inputs, actual value in percent, AI 0</i>	Tlak (100 % = 250 bar)	%
	r.4055[1]	<i>TB30 analog inputs, actual value in percent, AI 1</i>	Tlak (100 % = 250 bar)	%
GU2_INF	r.82[1]	<i>Active power actual value</i>	Příkon (nefiltrovaný)	kW

Tab. 4 Parametry měniče využité při měření v projektu ALFA

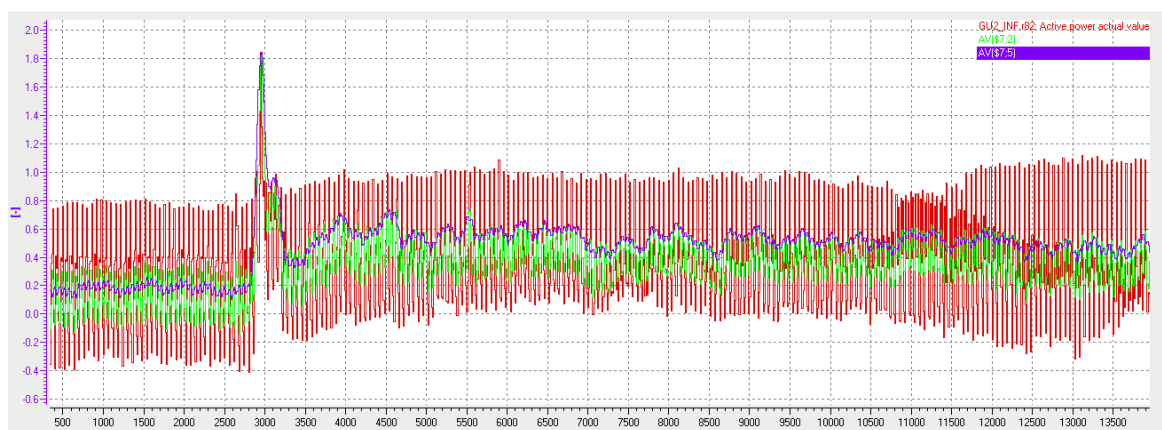
5.2. Parametry měniče využité při měření Analýza měřených dat

Mým úkolem zde bylo pořízená data analyzovat a využít při tom matematické funkce a následně je převést do grafů pomocí programu Microsoft Excel (2010).

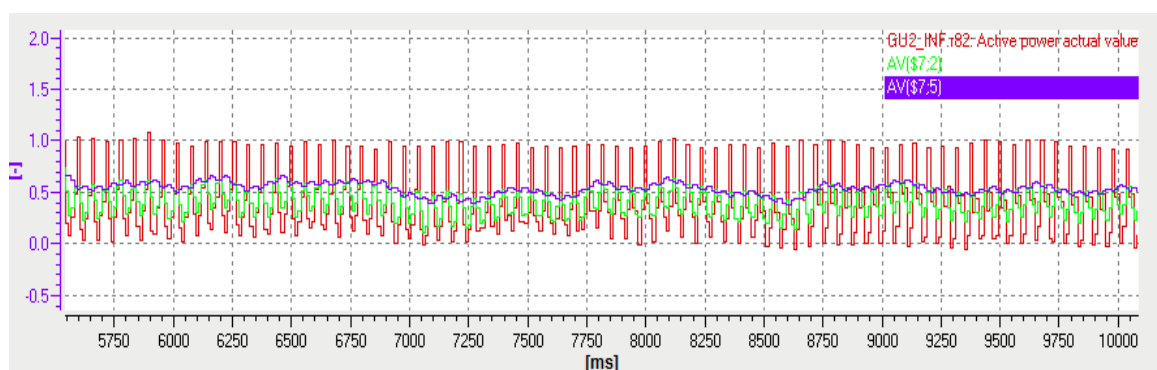
Pro určení střední hodnoty příkonu a výkonu jsem využila matematickou operaci *Int*, tj. integrace signálu, kterou lze velmi jednoduše použít v nabídce funkce *Trace*, nebo je možné provést integraci signálu v programu Excel, tato varianta je však pracnější.

Protože měřený parametr příkonu GS1_M1 r.82[1] *Active power actual value* je nefiltrovaný, pro další zpracování je nutné jej upravit pomocí nabízených matematických funkcí, konkrétně *AV – Mean value filtr*.

Následující obrázek 5.2 ukazuje výhodu této funkce, původní nefiltrovaný signál je zobrazen červeně, signál filtrovaný filtrem 2. řádu zeleně a signál filtrovaný filtrem 5. řádu fialově. Obrázek 5.3 představuje stejné signály, ale v zobrazení při větším přiblížení (jedná se o výřez signálů).



Obr. 5.1 Signál nefiltrovaný a po filtraci



Obr. 5.2 Signál nefiltrovaný a po filtraci - detail

Pro názornost zde vybírám 2 měření z celé skupiny provedených měření. Měření č. 19 – zvedání břemene a měření č. 36 – spouštění břemene.

5.2.1. Měření č. 19

Měření č. 19 probíhalo s těmito vstupními hodnotami:

Zátěž: $m = 300\text{kg}$

Časový krok: $\Delta t = 12\text{ ms}$

Zrychlení: $a = 400\text{ mm/s}^2$

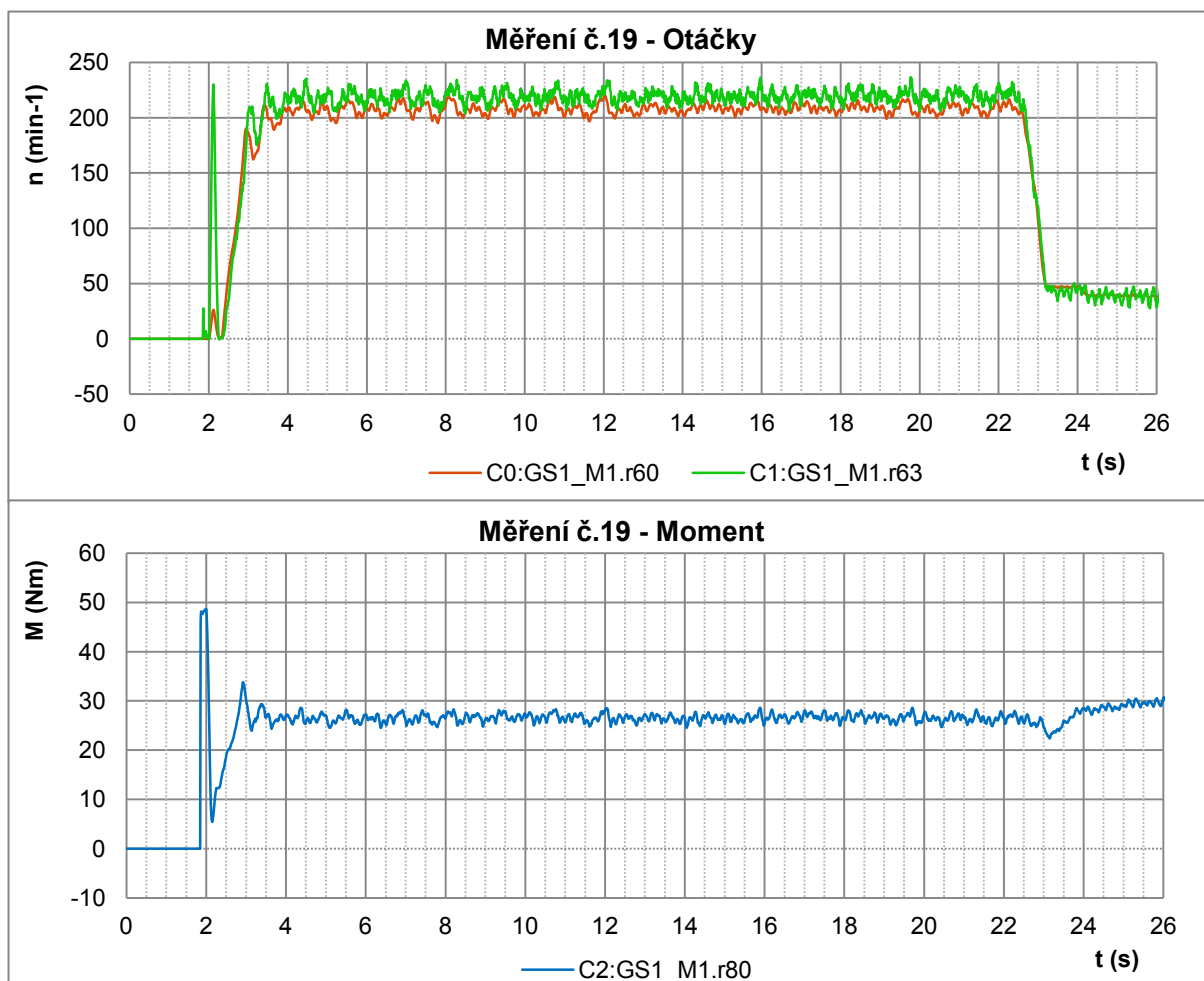
Směr pohybu: zvedání břemene

Dráha: $s = 2000\text{ mm}$

Rychlost: $v = 0,1\text{ m/s}$

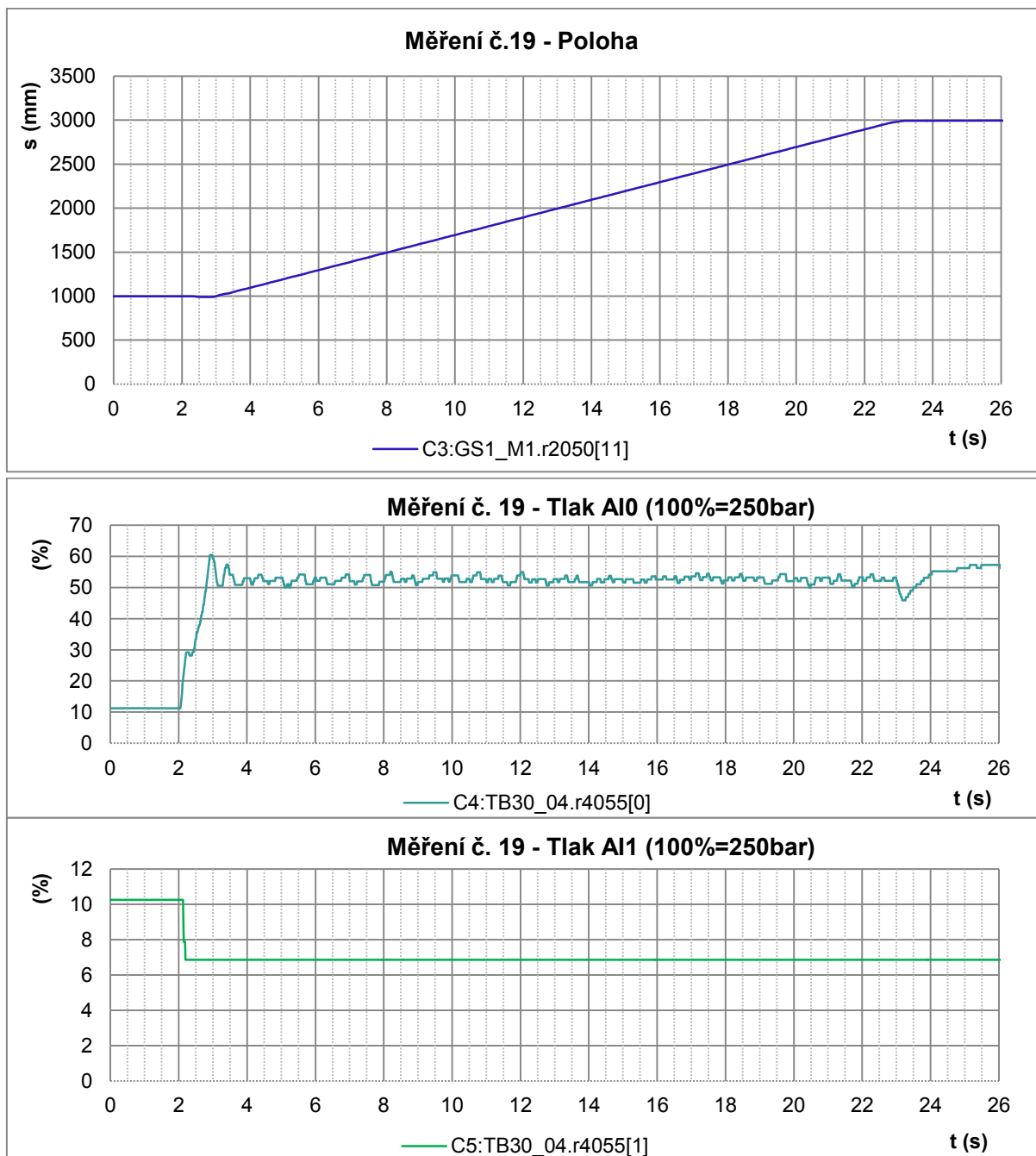
Snímač: $s = 998,1 \rightarrow 2992,9\text{ mm}$

Obrázek 5.3a představuje snímání otáček při zvedání břemene. Oranžově je zobrazen průběh žádaných otáček motoru, zeleně jsou zobrazeny skutečné otáčky. Obr. 5.3b představuje měření momentu při zvedání břemene.



Obr. 5.3a,b Žádané a skutečné otáčky, moment motoru

Obr. 5.3c představuje změnu polohy břemene z hodnoty 1000 mm na 3000 mm. Změny tlaku hydraulického pohonu jsou patrné z obr. 5.3d,e.

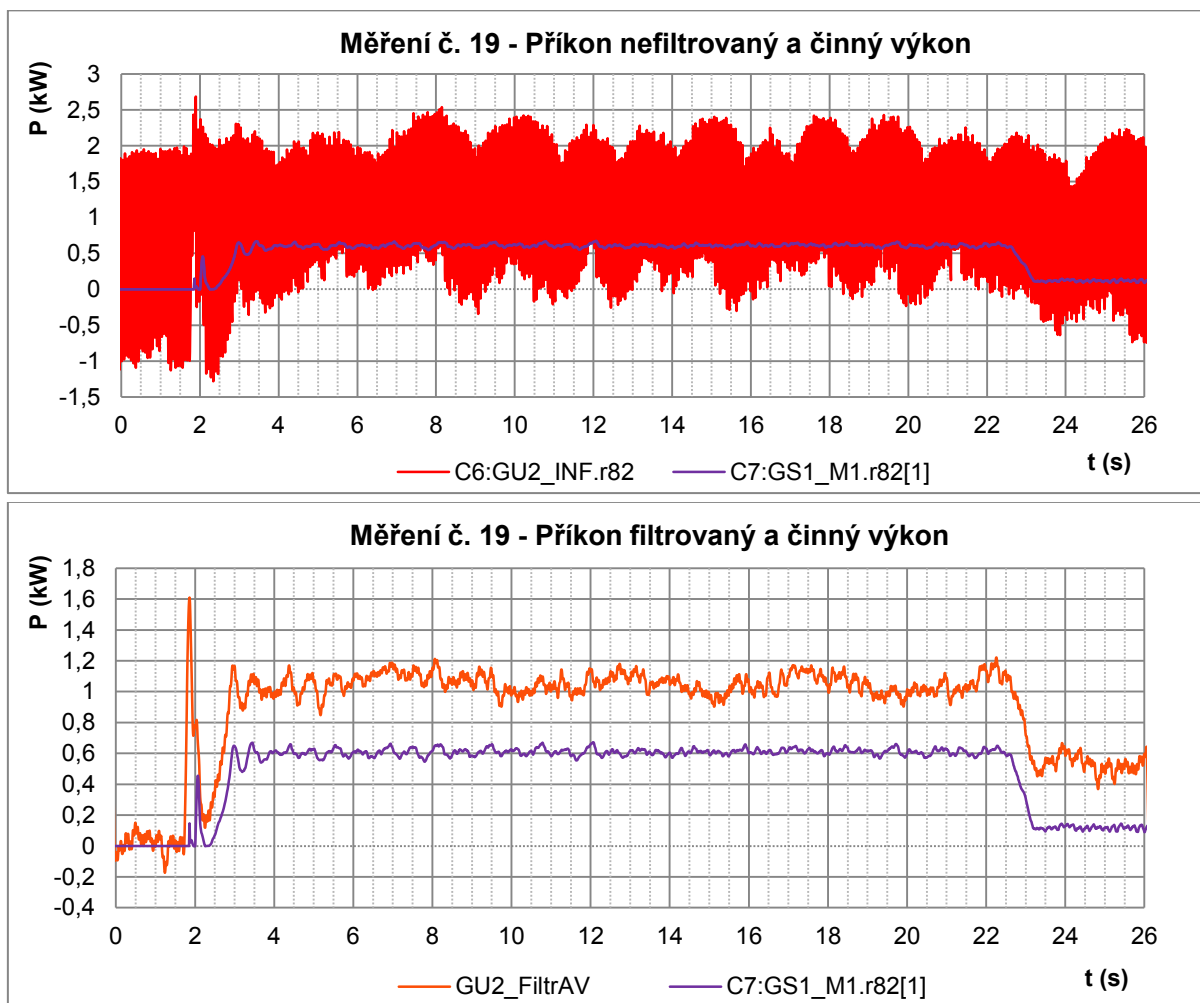


Obr. 5.3c,d,e Snímání polohy, tlaku AI0 a tlaku AI1

Velikost tlaku AI0 byla v době přesouvání břemene cca 53%, tj. 132,5 bar.

Velikost tlaku AI1 byla v době přesouvání břemene cca 6,86%, tj. 17,1 bar.

Na následujících obrázcích 5.3f,g je výsledek měření činného výkonu (fialově) a příkonu nefiltrovaného (červeně) a na druhém obrázku po filtraci (oranžový průběh).



Obr. 5.3f,g Měření příkonu nefiltrovaného, po filtraci a činného výkonu

Celkový čas měření byl 26112 ms.

Výpočet v Excelu:

Střední hodnota GS1(**Výkon**) = 486,02 W

Střední hodnota GU2 (**Příkon**) = 899,82 W

Účinnost pohonu = 54,01 %

Začátek rozběhu pohonu je charakteristický velkým záběrným momentem motoru, dosahuje hodnoty 48,6 Nm.

5.2.2. Měření č. 36

Měření č. 36 probíhalo s následujícími parametry:

Zátěž: $m = 400\text{kg}$

Časový krok: $\Delta t = 12\text{ ms}$

Zrychlení: $a = 800\text{ mm/s}^2$

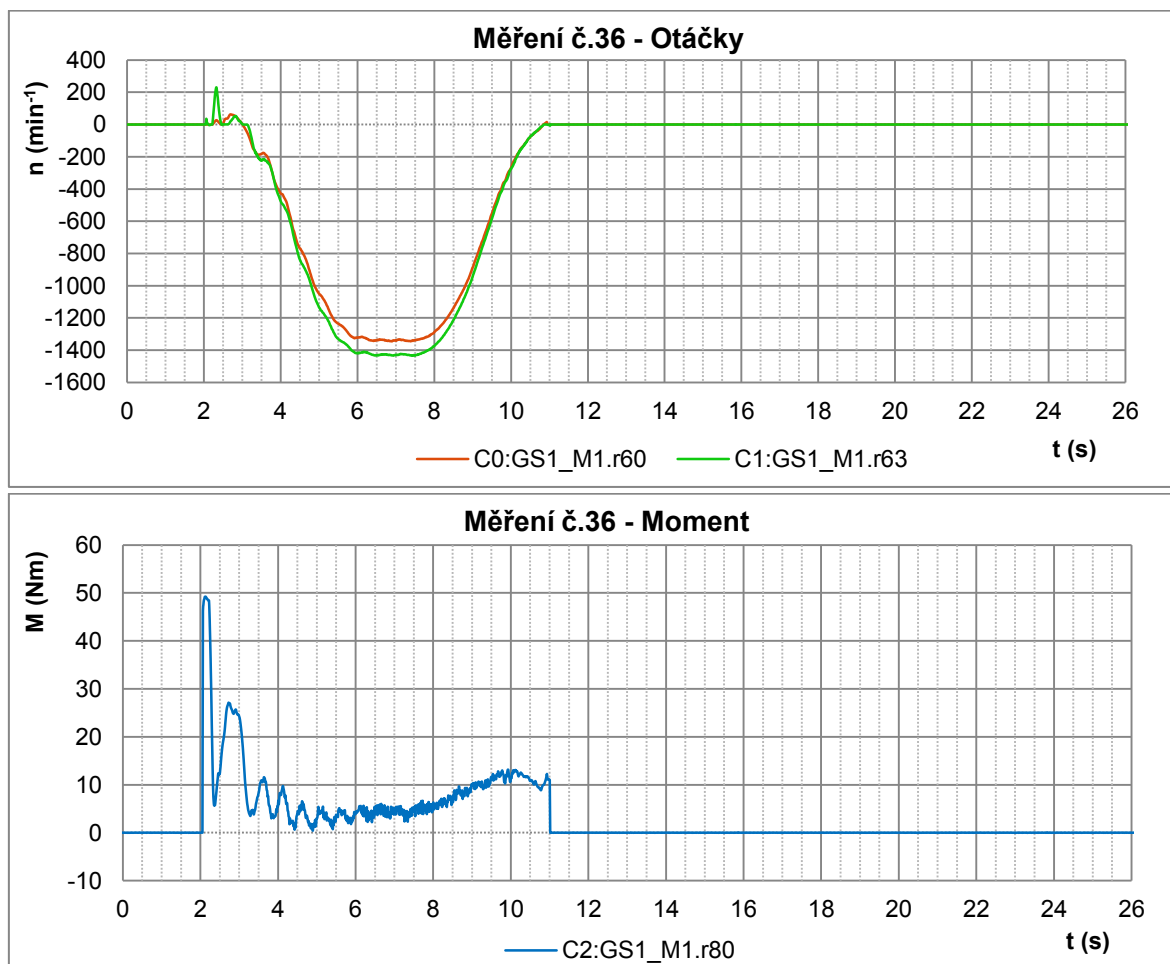
Směr pohybu: spouštění břemene

Dráha: $s = 2000\text{ mm}$

Rychlost: $v = 0,8\text{ m/s}$

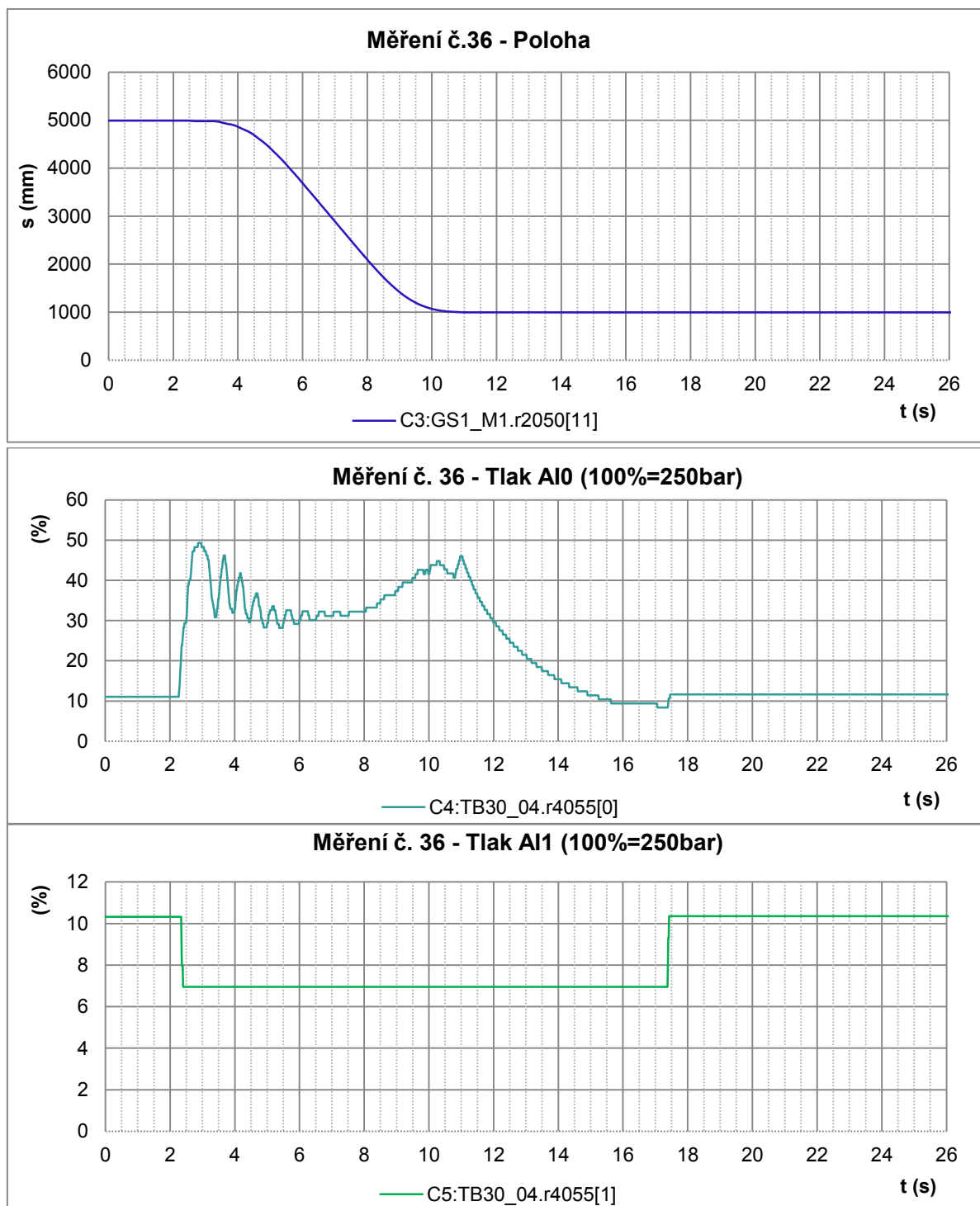
Snímač: $s = 4891,1 \rightarrow 995,5\text{ mm}$

Obrázek 5.4a představuje snímání otáček při spouštění břemene. Oranžově je zobrazen průběh žádaných otáček motoru, zeleně jsou zobrazeny skutečné otáčky. Velký záběrný moment motoru je, stejně jako u předchozího měření, patrný na začátku rozběhu pohonu a představuje jej obr. 5.4b.



Obr. 5.4a,b Žádané a skutečné otáčky, moment motoru

Změna polohy je zaznamenána na obr. 5.4c, změny tlaku pak na obr. 5.4d,e.

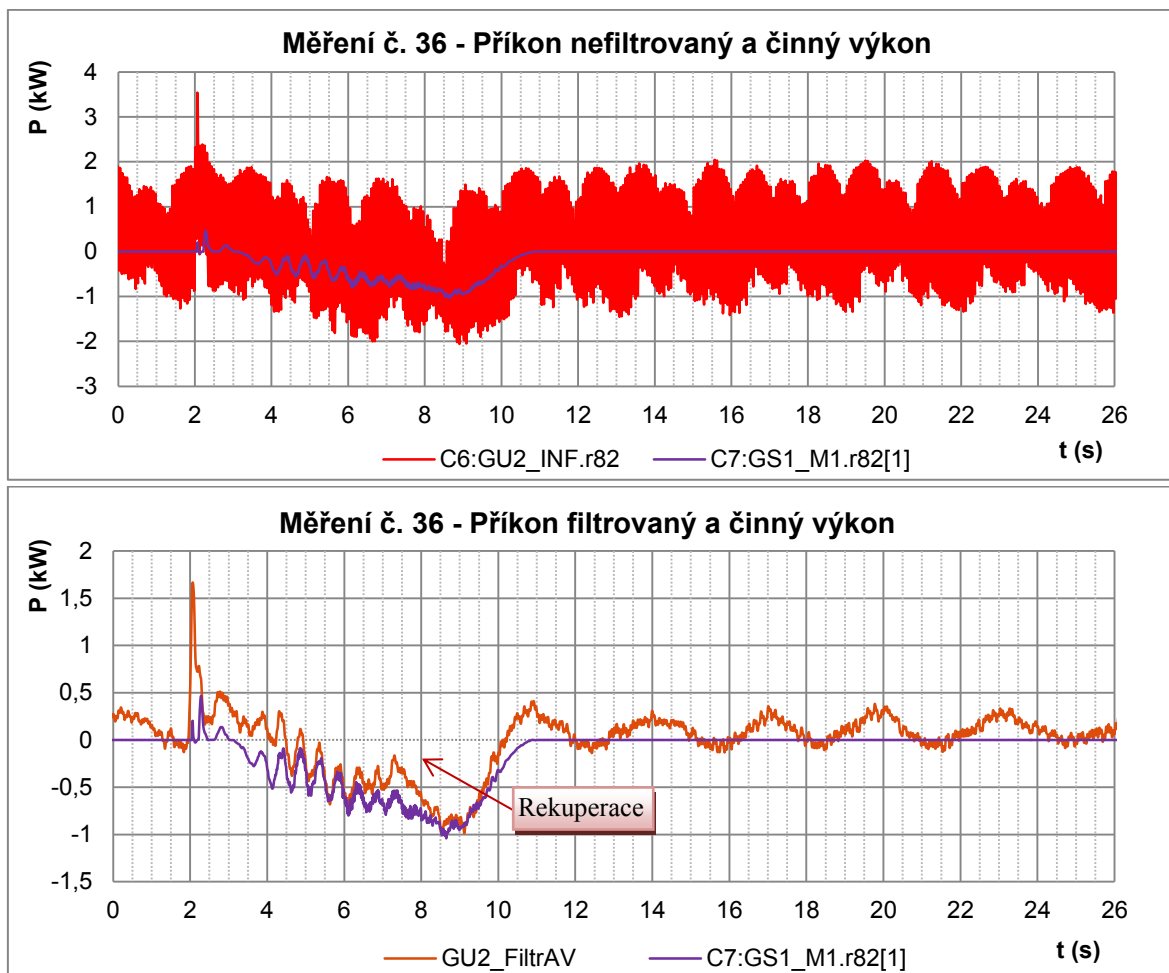


Obr. 5.4c,d,e Snímání polohy, tlaku AI0 a tlaku AI1

Velikost tlaku AI0 byla v době přesouvání břemene cca 6,95%, tj. 17,38 bar.

Velikost tlaku AI1 byla v době přesouvání břemene v rozmezí cca 30 ÷ 50 %, tj. 75 ÷ 125 bar.

Obrázky 5.4f,g představují měření činného výkonu (fialově), který v době spouštění břemene dosahuje záporných hodnot. Příkon nefiltrovaný je na obr. 5.4f zobrazen červeně, na obr. 5.4g je oranžově zobrazen příkon filtrovaný pomocí matematické funkce.



Výpočet v Excelu:

Střední hodnota GS1(Výkon) = -146,78 W

Střední hodnota GU2 (Příkon) = 1,58 W

Výkon motoru je při spouštění břemene opačného směru, dochází zde k urychlování při spouštění břemene, na rozdíl od případu volného spouštění břemene, kdy by rychlost spouštění byla nižší.

Při vhodně zvolených vstupních parametrech (hmotnost břemene, zrychlení, délka přesunu břemene a rychlost pohybu) je možné dosáhnout rekuperace elektrické energie z motoru do sítě, tak jako je tomu i u tohoto měření.

6. Závěr

Problematika měničů kmitočtu je velmi rozsáhlá, nelze ji obsáhnout v jediné diplomové práci, proto zde bylo hlavním cílem práce provedení základní analýzy monitoringu parametrů měniče Sinamics S120 a analyzovat vybraná měření.

Odrázovým bodem pro tuto diplomovou práci, byla diplomová práce z r. 2007, autor Tomáš Dolníček, na kterou navazují a hlouběji popisují některé z funkcí ovládacího programu měniče, zejména způsob zaznamenávání změřených průběhů, podrobně zde rozvádím jednotlivé matematické funkce, jejichž funkčnost jsem následně ověřila při analýze praktických měření.

Prvním typem měření a analýzy změřených dat, bylo měření ve školní laboratoři, jednalo se zde o vektorové řízení asynchronního motoru, který byl přes mechanickou spojku spojen s tachogenerátorem. Provedeno bylo několik měření, nejrozsáhlejším bylo měření rozběhu a brzdění AM naprázdno. Všechna tato měření byla zaznamenána pomocí funkce *Trace* ovládacího programu *Starter* (verze 4.3) která umožňuje měřit vybrané parametry jednotlivých modulů, ze kterých se sestává vlastní měnič. Tyto změřené průběhy byly následně exportovány ve formátu *.csv a poté otevřeny programem Microsoft Excel (2010). V programu Excel byly následně z importovaných hodnot jednotlivých měření vytvořeny grafy. Pro každé měření uvádím jednak detailní zobrazení určitého časového úseku měření a také graf společný pro více průběhů, pořízených v rámci daného měření. Výhodou programu Excel je právě možnost zobrazení těchto grafů s více průběhy, které lze zobrazit se stejným měřítkem a počátkem souřadného systému. Takovéto zobrazení několika průběhů v časovém grafu je v programu *Starter* prakticky nemožné, neboť každý jednotlivý průběh je zobrazen s vlastním měřítkem svislé osy a počátkem této osy. Vzájemné proporce jednotlivých měření, např. příkon CU a výkon AM tak nelze objektivně vyhodnotit, proto byl pro tyto účely volen program Excel.

Po analýze rozběhu a brzdění motoru naprázdno bylo původně zamýšleno pokračovat v dalším měření motoru v laboratoři, ale nakonec se ukázala možnost analyzovat data získaná v rámci projektu ALFA.

Jednalo se o spojení frekvenčního měniče a hydromotoru, kde bylo přes sérii kladek spouštěno a navíjeno lano, na jehož konci byla připevněna zátěž o hmotnosti, v rozpětí $100 \div 400$ kg. Řízení motoru bylo typu *Servo* a snímáno bylo 8 parametrů. Protože jeden z měřených parametrů – parametr příkonu GS1_M1 r.82[1] *Active power actual value* je k dispozici u tohoto typu modulu pouze jako nefiltrovaný, pro jeho další analýzu jsem využila dostupných matematických funkcí, konkrétně *AV – Mean value filtr*. Obr. 5.1 a 5.2 ukazuje aplikaci filtru 2. a 5. řádu na původní nefiltrovaný signál. Dále byly pro hodnoty příkonu a výkonu motoru vypočítány střední hodnoty a určená celková účinnost pohonu při zvedání břemene. Protože měření v rámci projektu ALFA je velmi rozsáhlé, je v této práci z celkového počtu 44 měření uvedeno pouze jedno měření, jako příklad zvedání břemene a druhé jako příklad spouštění břemene. Všechna měření jsou k dispozici v elektronické podobě na CD v příloze této práce.

Za svůj přínos bych označila detailní popsání a praktické vyzkoušení matematických operací, které jsou součástí ovládacího software měniče a mohou být využity při dalších měřeních, jak ve školní laboratoři, tak i při dalším výzkumu, buď v rámci projektu ALFA, nebo dalších.

Použitá literatura

- [1] *Brochure_sinamics_drives_2011_cz.pdf*. [online]. [cit. 2013-2-10].
URL: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/menice/_prospekty/brochure_sinamics_drives_2011_cz.pdf>
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová Elektronika, svazek III, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*, skripta. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. 252 s. ISBN 80-7082-485-9.
- [3] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová Elektronika I pro kombinované a distanční studium, Základní polovodičové měniče*, učební texty. Ostrava, 2003.
- [4] KOČMAN, Stanislav. *Asynchronní stroje*. Ostrava, 2002. [online]. [cit. 2013-2-24].
URL: <http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/.../syllab_Asynchronni%20stroje_bc%20FS.pdf>
- [5] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*, elektronická skripta. Brno, 2007. [online]. [cit. 2013-2-24].
URL: <http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=18964>
- [6] BRANDŠTETTER, Pavel. *Elektrické regulované pohony III, část 3.pdf*, učební texty pro kombinované a distanční studium, Ostrava, 2005. [online]. [cit. 2013-3-11].
URL: <http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/ERP3/Studijni_opory/ERP3_3.pdf>
- [7] BRANDŠTETTER, Pavel. *Elektrické regulované pohony III, část 4.pdf*, učební texty pro kombinované a distanční studium, Ostrava, 2005. [online]. [cit. 2013-3-11].
URL: http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/ERP3/Studijni_opory/ERP3_4.pdf>
- [8] Wikipedie encyklopedie, *Rekuperace*. [online]. [cit. 2013-3-17].
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rekuperace>>
- [9] VACULÍK, Petr. *P2_Vykonove_polovodicove_soucastky.pdf*, učební texty. Ostrava [2012-10-9]. s. 2.

Seznam příloh

[A] Projekt ALFA

[B] CD

Příloha A : Projekt ALFA

Při tomto měření bylo provedeno celkem 44 měření, respektive měření č. 1 až 38 a navíc 6 měření doplňujících, s označením č. Rxxa

Seznam všech provedených měření a parametry měření

Měření č.	Zátěž <i>m</i> (kg)	Čas. krok Δt (ms)	Zrychlení <i>a</i> (mm/s ²)	Směr pohybu	Dráha <i>s</i> (m)	Rychlost <i>v</i> (m/s)	Poznámka
R01	100	12	400	zvedání	2000	0,1	
R02	100	12	400	spouštění	2000	0,1	
R03	100	12	400	zvedání	3000	0,5	
R04	100	12	400	spouštění	3000	0,5	
R05	100	12	400	zvedání	4000	0,8	
R06	100	12	400	spouštění	4000	0,8	
R07	100	12	200	zvedání	4000	0,8	
R08	100	12	200	spouštění	4000	0,8	
R08a	100	4	200	spouštění	4000	0,8	
R09	200	12	400	zvedání	2000	0,1	
R10	200	12	400	spouštění	2000	0,1	
R11	200	12	400	zvedání	3000	0,5	
R12	200	12	400	spouštění	3000	0,5	Rekuperace
R13	200	12	400	zvedání	4000	0,8	
R14	200	12	400	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R15	200	12	800	zvedání	4000	0,8	
R16	200	12	800	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R17	200	12	1000	zvedání	4000	0,8	
R18	200	12	1000	spouštění	4000	0,8	
R18a	200	4	1000	spouštění	4000	0,8	
R19	300	12	400	zvedání	2000	0,1	
R20	300	12	400	spouštění	2000	0,1	
R21	300	12	400	zvedání	3000	0,5	
R22	300	12	400	spouštění	3000	0,5	Rekuperace

Měre- ní č.	Zátěž <i>m</i> (kg)	Čas. krok Δt (ms)	Zrychlení <i>a</i> (mm/s ²)	Směr pohybu	Dráha <i>s</i> (m)	Rychlost <i>v</i> (m/s)	Poznámka
R23	300	12	400	zvedání	4000	0,8	
R23a	300	4	400	zvedání	4000	0,8	
R24	300	12	400	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R24a	300	4	400	spouštění	4000	0,8	
R25	300	12	800	zvedání	4000	0,8	
R26	300	12	800	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R27	300	12	800	zvedání	4000	0,8	trhnutí 250 mm/s ²
R28	300	12	800	spouštění	4000	0,8	Rekuperace; trhnutí 250 mm/s ²
R29	400	12	400	zvedání	2000	0,1	
R30	400	12	400	spouštění	2000	0,1	
R31	400	12	400	zvedání	3000	0,5	
R32	400	12	400	spouštění	3000	0,5	Rekuperace
R33	400	12	400	zvedání	4000	0,8	
R34	400	12	400	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R35	400	12	800	zvedání	4000	0,8	
R35a	400	4	800	zvedání	4000	0,8	
R36	400	12	800	spouštění	4000	0,8	Rekuperace
R36a	400	4	800	spouštění	4000	0,8	
R37	400	12	800	zvedání	4000	0,8	trhnutí 250 mm/s ²
R38	400	12	800	spouštění	4000	0,8	Rekuperace; trhnutí 250 mm/s ²

Tab. A1 Seznam a parametry měření

K rekuperaci elektrické energie dochází v případech měření R24, R26, R28, R32, R34, R36, R38. Největších hodnot dosahuje v případech hmotnosti zátěže 400 kg, se zrychlením 800 m.s⁻², délkou spouštění břemene 4000 mm a s rychlostí 0,8 m.s⁻¹.

U měření R12, R14, R16 a R22 je patrný pouze krátký zákmit příkonu a výkonu do záporných hodnot.

Při měření č. 1 – 38 byly ke snímání činnosti pohonu použity tyto parametry:

Parametr č.	Název parametru	Označení parametru (STARTER)
1.	Žádaná hodnota otáček (min^{-1})	GS1_M1.r60: <i>Speed setpoint before the setpoint filter</i>
2.	Skutečné otáčky motoru (min^{-1})	GS1_M1.r63: <i>Actual speed smoothed</i>
3.	Skutečný točivý moment (Nm)	GS1_M1.r80: <i>Torque actual value</i>
4.	Poloha (mm)	GS1_M1.r2050[11]: <i>IF1 PROFIdrive PZD receive word, PZD 12</i>
5.	Tlak (100 % = 250 bar)	TB30_04.r4055[0]: <i>TB30 analog inputs, actual value in percent, AI 0 (X482.1/X482.2)</i>
6.	Tlak (100 % = 250 bar)	TB30_04.r4055[1]: <i>TB30 analog inputs, actual value in percent, AI 1 (X482.3/X482.4)</i>
7.	Příkon nefiltrovaný (kW)	GU2_INF.r82: <i>Active power actual value</i>
8.	Výkon filtrovaný (kW)	GS1_M1.r82[1]: <i>Active power actual value, Smoothed with p0045</i>

Tab. A2 Parametry použité při měření č. 1 - 38

Z každého takového měření je pořízen záznam ve formátu Rxx.trc

Pro parametr č. 7 byla u všech měření provedena filtrace signálu, pomocí matematické operace *AV* – *Mean value filtr*. Signál byl filtrován filtrem 5. řádu.

Pro parametry č. 7 a 8 byla také provedena další matematická operace – *Int*, tj. integrace signálu.

Po provedení těchto matematických operací byly průběhy uloženy do samostatného souboru Rxx_integr.trc, protože maximální počet parametrů je 8, došlo by k přepsání některých parametrů. Obsah těchto souborů je následující:

- C0: GU2_INF.r82: *Active power actual value*
- C1:GS1_M1.r82[1]: *Active power actual value, Smoothed with p0045*
- C2:Int(\$7) – integrovaný signál GU2_INF.r82
- C3:Int(\$8) – integrovaný signál GS1_M1.r82[1]
- C4:AV(\$7;5) – filtrovaný signál GU2_INF.r82

Soubory Rxx.trc a Rxx_integr.trc byly následně exportovány ve formátu *.csv.

Programem Microsoft Excel byla data upravena, spojena z 2 souborů do jednoho, ve kterém jsou uvedeny výpočty střední hodnoty výkonu, příkonu a účinnost pohonu při zvedání břemene a vykresleny grafy pro jednotlivé signály.

Při měřeních doplňujících (např. R08a.trc) byly snímány tyto parametry:

Parametr č.	Název parametru	Označení parametru (STARTER)
1.	Skutečné otáčky motoru (min^{-1})	GS1_M1.r63: <i>Actual speed smoothed</i>
2.	Skutečný točivý moment (Nm)	GS1_M1.r80: <i>Torque actual value</i>
3.	Příkon nefiltrovaný (kW)	GU2_INF.r82: <i>Active power actual value</i>
4.	Výkon filtrovaný (kW)	GS1_M1.r82[1]: <i>Active power actual value, Smoothed with p0045</i>

Tab. A3 Parametry použité při doplňujících měření

Ty byly opět doplněny matematickými operacemi integrování pro signál 3 a 4 a filtrace 5. řádu pro signál č. 3.

Vzhledem k tomu, že nedošlo k překročení počtu max. 8 parametrů, byli signály jak původní změřené, tak upravené matematickými funkcemi, uloženy do jednoho souboru Rxxa.trc a poté exportovány ve formátu Rxxa.csv. Opět byly následně zpracovány v programu Excel, viz měření 1 až 38.